

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

Kimmo Virta

**VEDESSÄ PYÖRIVÄ SUURNOPEUKSINEN SÄHKÖMOOTTORI
PUMPPUKÄYTTÖÄ VARTEN**

Dilomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 29.10.77

Työn valvoja


Tapani Jokinen

18948

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

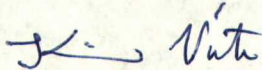
ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun sähkömekaniikan laboratoriossa.

Työn valvojaa, professori Tapani Jokista, kiitän saamastani ohjauksesta ja kiinnostuksesta työtäni kohtaan. DI Jarmo Perhoa kiitän saamistani neuvoista. Kiitän myös DI Jukka Seppästä Lappeenrannan teknillisestä korkeakoulusta hänen tekemistään lujuus-teknisistä laskelmista, joita tarvitsin työssäni.

Sähkömekaniikan laboratorion koko henkilökuntaa kiitän leppoisan työskentelyilmapiirin luomisesta.

Espoossa 26.10.1992



Kimmo Virta

Tekijä:	Kimmo Virta		
Työn nimi:	Vedessä pyörivä suurnopeuksinen sähkömoottori pumppukäyttöä varten		
Päivämäärä:	26.10.1992	Sivumäärä:	55
Osasto:	Sähkötekniikka		
Professuuri:	Svt-17 Sähkötekniikka (sähkömekaniikka)		
Työn valvoja:	professori Tapani Jokinen		
Työn ohjaaja:	—		
<p>Työssä tarkastellaan oikosulkumoottorin ja kestopagneettimoottorin soveltuvuutta suurnopeuspumpun käyttömoottoriksi. Pumpattava vesi kulkee moottorin läpi staattorin ja roottorin välissä.</p> <p>Moottorin pyörimisnopeus on 150 000 r/min ja pumpun tarvitsema teho on 4,2 kW. Vedestä aiheutuvat kitkahäviöt on laskettu kirjallisuudessa esitetyn teorian mukaisesti ja ne on otettu huomioon moottorilta vaadittavan vääntömomentin määrittämisessä. Roottorin taivutuskriittisten ominaistuuksien ja keskipakovoimista aiheutuvien jännitysten laskennassa on käytetty ulkopuolista asiantuntemusta.</p> <p>Sähkömagneettisesta mitoituksista on esitetty perinteisen sähkökoneen suunnittelun keinoin tehty lähtömitoitus, jota tarkennettiin elementtimenetelmään perustuvalla magneettikentän laskentaohjelmistolla. Kestomagneettimoottorin osalta on laskettu lämpenemiä lämpöverkon ja lämpökentän kenttäratkaisun yhdistävällä ohjelmistolla. Lämmönsiirtokertoimet on laskettu kirjallisuudessa esitettyä teoriaa soveltaen.</p> <p>Tuloksena saatuja mitoituksia on käytetty verrattaessa oikosulku- ja kestopagneettimoottorin soveltuvuutta käyttötilanteeseen.</p>			
Avainsanat: suurnopeus, sähkömoottori, pumppu, vesi			

**HELSINKI UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY**

**ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS**

Author:	Kimmo Virta		
Name of the thesis:	Water containing electrical high speed motor for pump drive		
Date:	26.10.1992	Number of pages:	55
Faculty:	Electrical Engineering		
Professorship:	Svt-17 Electrical Engineering (Electromechanics)		
Supervisor:	professor Tapani Jokinen		
Instructor:	—		
<p>The applicability of a cage induction motor and a permanent magnet motor for running a high speed pump is investigated in this work. The water to be pumped runs through the space between stator and rotor.</p> <p>The motor runs at the speed of 150 000 rpm and the power needed in the pump is 4,2 kW. Friction losses caused by the water have been calculated using common method presented in literature. They have been taken into account in determining the torque demanded of the motor. External consultation was used in calculations for the critical speeds of the rotor and the tensions caused by the centrifugal force and occurring inside the rotor.</p> <p>The conventional electromagnetic design is presented much in detail. The preceeding measures resulting from the conventional design have been further developed using field simulation programs based on finite element method. As for the permanent magnet motor also temperature rises have been calculated using a program that combines thermal network in stator and temperature field solution of the rotor. Heat transfer coefficients have been calculated by the means presented in literature.</p> <p>The results were used to help the evaluation of the applicability of the two motor types investigated.</p>			
<p>Avainsanat: high speed, electrical machine, cage induction motor, permanent magnet motor, water pump</p>			

SISÄLLYSLUETTELO

Alkulause.....	2
Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Sisällysluettelo.....	5
Käytetyt merkinnät.....	6
1 Johdanto.....	8
1.1 Taustaa ja tavoite.....	8
1.2 Aiheeseen liittyviä ongelmia.....	8
1.3 Laskentamenetelmä.....	9
1.4 Rajausta.....	10
2 Moottorin mitoittaminen.....	11
2.1 Tutkittavien moottoreiden rakenne.....	11
2.2 Mekaaninen mitoitus.....	12
2.2.1 Vedestä aiheutuvat mekaaniset häviöt.....	12
2.2.2 Roottorin lujuustekninen mitoitus.....	16
2.2.3 Tarvittava vääntömomentti.....	19
2.3 Sähkömagneettinen mitoitus.....	20
2.3.1 Mitoituksen kulku.....	20
2.3.2 Staattorin alustava mitoitus.....	22
2.3.3 Oikosulkumoottori.....	30
2.3.4 Kestomagneettimoottori.....	31
2.4 Lämpenemien laskenta ja lopullinen mitoitus.....	35
2.5 Laskennassa käytettävät materiaalitiedot.....	39
3 Mitoituksen tulokset.....	40
3.1 Oikosulkumoottori.....	41
3.2 Kestomagneettimoottori.....	47
4 Moottorivaihtoehtojen vertailu.....	50
5 Johtopäätökset.....	52
6 Yhteenveto.....	53
Lähdeluettelo.....	54
Liite 1: Laskennassa käytettäviä lähtötietoja.....	55

KÄYTETYT MERKINNÄT

Symbolit:

α	lämmönsiirtokerroin
A_{js}	staattorijohtimen poikkipinta
A_{us}	staattoriuran poikkipinta
B	magneettivuontiheys
B_r	remanenssivuontiheys
C	sähkömoottorin konevakio
$\cos\varphi$	tehokerroin
c_p	ominaislämpökapasiteetti
C_T	momentin vastuskerroin
D	staattorin sisähalkaisija
δ	ilmaväli
δ'	kestomagneettimoottorin napakulma
d_h	hydraulinen halkaisija
D_r	roottorin halkaisija
D_s	staattorin ulkohalkaisija
D_u	staattoriselän sisähalkaisija
Φ	magneettivuo
$f_{1,2}$	syöttöjännitteen perusaallon taajuus
$\Phi_{1,3}$	perusaallon ja kolmannen yliaallon magneettivuo
f_{Cu}	kuparin täytekerroin
f_{Fe}	raudan täytekerroin
γ	sähkönjohtavuus
Gr	Grasshofin luku
H	magneettikentänvoimakkuus
η	hyötysuhde
H_c	koersitiivikentänvoimakkuus
h_s	staattoriselän korkeus
I	virta, tehollisarvo
J_s	staattorijohtimen virrantiheys
K	pinnan epätasaisuuskerroin
k_R	staattorikäämin virranahtokerroin
k_{Rs}	virranahtokerroin vyyhdenpäässä
k_{Ru}	virranahtokerroin staattoriurassa
k_w	käämikerroin
L	induktanssi
Λ	permeanssi
λ	lämmönjohtavuus
L'	staattorin (ja roottorin) tehollinen pituus
l_m	staattorikäämin yhden johdinkierroksen keskimääräinen pituus
l_s	staattorikäämin vyyhdenpään keskimääräinen pituus
m	vaiheluku
μ	viskositeetti
$m_{1,2}$	pistemassoja
μ_o	tyhjiön permeabiteetti

n	pyörimisnopeus
N_c	vyyhden kierrosluku
Nu	Nusseldtin luku
p	napapariluku
P_a	akseliteho
P_f	kitkahäviö
P_p	pumpun teho
Pr	Prandtlin luku
p_{Ti}	titaanipannan paksuus
Q	uraluku
q	vakoluku
q_m	veden massavirta
q_v	veden tilavuusvirta
R	roottorin säde
r	säde
ρ	tiheys
Re	Reynoldsin luku
R_s	staattorikäämin resistanssi
R_t	tasavirtaresistanssi
s	aksiaalivällys, jättämä
T	vääntömomentti
t	lämpötila
τ	urajako
T_b	kippermomentti
T_C	Curie-lämpötila
U	pääjännite, tehollisarvo
v_{aks}	aksaalinen nopeus
v_{red}	redusoitu nopeus
ω	sähkökulmanopeus
ξ	redusoitu johdinkorkeus
$X_{\sigma w}$	vyyhdenpään reaktanssi
Ψ	käämivuo

Alaindeksit

e	sähkömagneettinen
m	massa
r	pyörivä kiekko, roottori
s	staattori
σ	haja
τ	ilmaväli
v	tilavuus, vaihesuure
f	kitka
Cu	kupari
Fe	rauta

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa ja tavoite

Suurnopeusmoottoreiden etuna on keveys ja pieni koko, mikä houkuttelee käyttämään niitä monissa sovelluksissa. Tässä diplomityössä tutkitaan suurnopeussähkömoottoria, joka pyörittää samalla akselilla olevaa suurnopeuspumppua ilman mekaanista vaihdetta. Pumpattava vesi virtaa moottorin ja laakereiden läpi.

Tutkimuskohteena on oikosulkumoottori ja kestopagnetoitu tahtimoottori, joiden sisällä ilmapälissä on siis vettä. Tarkoituksena on selvittää, onko näistä konetyypeistä mahdollista saada riittävä momentti, kun moottoreiden geometrisille mitoille rajoituksia asettavat vesikitkahäviöt otetaan huomioon. Pyöritettävä pumppu vaatii tehon 4,2 kW ja pumpun ja moottorin yhteinen pyörimisnopeus on n. 150 000 r/min. Jos tämä on mahdollista molemmilla moottorivaihtoehdoilla, tuloksena esitetään, kumpi soveltuu paremmin käyttötilanteeseen. Valintakriteereinä käytetään kupari- ja rautahäviöitä, tehokerrointa ja hyötysuhdetta.

Työn tulosten perusteella on tarkoitus päättää pumppukäyttöön tulevan suurnopeusmoottorin tyyppi. Tuloksia käytetään edelleen lähtökohtana koemoottorin valmistuksessa.

1.2 Aiheeseen liittyviä ongelmia

Suurnopeusmoottorin suunnittelija törmää moniin ongelmiin, joita ei esiinny tavanomaisten koneiden suunnittelussa (Pyrhönen, 1988).

- Hyvin suurilla pyörimisnopeuksilla (100 000 r/min ... 200 000 r/min) keskipakoisvoimat kasvavat kohtuuttoman suuriksi.
- Roottorin (erityisesti avonapaisen) jäähdytysaineen kitkahäviöt ovat suuret.
- Roottorin pinnassa syntyy voimakkaita pyörrevirtoja, jotka yhdessä tuuletushäviöiden kanssa pyrkivät nostamaan toimintalämpötilaa.
- Staattorikäämissä muodostuu voimakasta virranahtoa suurilla syöttötaajuuksilla.
- Moottorin laakeroinnissa ei voida yleensä sallia mekaanista kosketusta roottorin akselin ja laakerin välillä.
- Pienet laakerivälit vaativat tärinätöntä pyörimistä. Tärinää aiheutuu mm. magneettisista voimista ja epätarkasta tasapainotuksesta.

Suunniteltavan moottorin sisältämästä vedestä aiheutuu suuret kitkahäviöt, jotka kasvavat voimakkaasti roottorin halkaisijan kasvaessa. Tästä syystä roottorin tulisi olla mahdollisimman pieni. Toisaalta pieni koko on ongelmallinen lujuuden kannalta, sillä ensimmäinen taivutuskriittinen pyörimisnopeus laskee lähelle tarvittavaa pyörimisnopeutta roottorin koon pienentyessä.

Lujuusoppi

Suuri pyörimisnopeus asettaa lujuusteknisiä rajoituksia moottoreiden geometrialle, erityisesti roottorin koolle. Rajoittavia tekijöitä ovat roottorin kriittinen pyörimisnopeus (kriittinen taajuus), jolla se ei ole jäykkä tanko vaan käyttäytyy taivutuskappaleen tavoin, ja rakenteeseen keskipakovoiman vuoksi muodostuvat jännitykset, jotka voivat aiheuttaa rakenteen rikkoutumisen.

Jännitykset ovat riippuvaisia lähinnä kehänopeudesta ts. voimasta, joka 'repii' roottorin osia keskiakselista poispäin. Työssä tutkittavat roottoreiden kehänopeudet ovat alle 100 m/s, jota suurempia arvoja esiintyy perinteisissäkin turbokoneissa. Tästä aiheutuvat jännitykset ovat hallittavissa materiaalivalinnoilla.

Vaikeamman ongelman muodostaa lähelle suunnittelun perustana olevaa pyörimisnopeutta tuleva ensimmäinen taivutuskriittinen nopeus. Erityisesti kestomagneettiroottori tuottaa vaikeuksia, koska sen ytimenä oleva magneettimateriaali on kantavuudeltaan heikompaa kuin akseliteräs. Jotta ensimmäinen taivutuskriittinen pyörimisnopeus olisi riittävän korkea, roottorin halkaisija täytyy pitää mahdollisimman suurena ja koneen pituus mahdollisimman pienenä. Suuri halkaisija taas aiheuttaa suuret kitkahäviöt, koska roottoria ympäröi vesi.

Häviöt

Suurnopeuskoneessa kaasukitkahäviöt voivat olla varsin merkittävät suuresta kehänopeudesta ja pienestä yksikkökoosta johtuen (Larjola 1984). Vesi moottorin sisällä lisää vielä kitkahäviöitä ilmaa sisältäviin moottoreihin verrattuna. Toisaalta vesi helpottaa huomattavasti jäähdytystä. Roottorin häviöteho siirtyy veteen tehokkaasti, ja sen ilmaan verrattuna nelinkertainen ominaislämpökapasiteetti ja tuhatkertainen tiheys siirtävät lämmön helposti pois 'ilmavälistä'. Täten roottorihäviöiden vaikutus toimintalämpötilan nousuun on pienempi verrattuna ilmajäähdytteisiin suurnopeusmoottoreihin.

Itseisarvoltaan ja taajuudeltaan suuri staattorivirta aiheuttaa voimakasta virranahtoa ja suuret resistiiviset häviöt. Tämän vuoksi käämien lämpeneminen on voimakasta, sillä johtimien suora vesijäähdytys on pienen koon vuoksi vaikea järjestää.

Veden vastuksen voittamiseksi tarvittava mekaaninen teho pienentää moottorin akselilta hyödyksi saatavaa tehoa ja lämmittää jäähdytysaineena toimivaa vettä. Kirjallisuuden mukaan vesikitkan aiheuttama häviöteho on verrannollinen roottorin halkaisijan viidenteen potenssiin. Tästä syystä moottorin hyötysuhdetta voidaan oleellisesti parantaa pyrkimällä mahdollisimman pieneen roottorihalkaisijaan.

1.3 Laskentamenetelmä

Moottoreiden sähkömagneettinen mitoitus tehdään elementtimenetelmään perustuvien tietokoneohjelmien avulla. Elementtimenetelmä on numeerinen menetelmä, jolla voidaan ratkaista reunaehdot sisältäviä differentiaaliyhtälöitä, kuten magneettikenttiä kuvaavat yhtälöt. Käytettävissä ohjelmissa on aikariippuvien magneettikenttien ratkaisu toteutettu askelmenetelmällä, jossa kenttä ratkaistaan useaan kertaan pienin aikavälein. Näin saadaan koneen toimintaa simuloitua erilaisilla syöttöjännitteen muodoilla. Tämä on oleellista käytettäessä taajuudenmuuttajaa, sillä varsinkin suurilla syöttötaajuuksilla sähköiset häviöt ovat pulssimuotoisella syöttöjännitteellä suuremmat kuin sinimuotoisella.

Tietokonelaskenta suoritetaan IBM RS 6000 työasemassa, jossa on unix-käyttöjärjestelmä. Kuvaajien piirtämiseen ja käsin lasketun mitoituksen apuna käytetään MATLAB-ohjelmaa. Moottorin poikkileikkauksien kenttä- ja elementtiverkkokuvat piirretään IBM 3090 tietokoneella, jossa on IBM VM/XA SP käyttöjärjestelmä.

1.4 Raja

Koneiden mitoitus on suuntaa-antava, eikä tässä vaiheessa ole tarkoituksena löytää optimaalisia ratkaisuja vaan vertailla eri moottorityyppien soveltuvuutta märkämoottoriksi. Työssä ei puututa laakereiden suunnitteluun, vaan ainoastaan niiden häviötehosta johtuva veden lisälämpenemä otetaan huomioon moottoreiden lämpenemää laskettaessa. Pumppua käsitellään vakiotehokuormana, joka pyörii tunnetulla pyörimisnopeudella. Laskentamenetelmien epätarkkuutta pohditaan kussakin yhteydessä erikseen. Oikosulku- ja kestopäällysmoottorin kentänlaskentaohjelmistot on kehitetty TKK:n sähkömekaniikan laboratoriossa. Tähän työhön sisältyy varsinaista ohjelmointityötä hyvin vähän.

2 MOOTTORIN MITOITTAMINEN

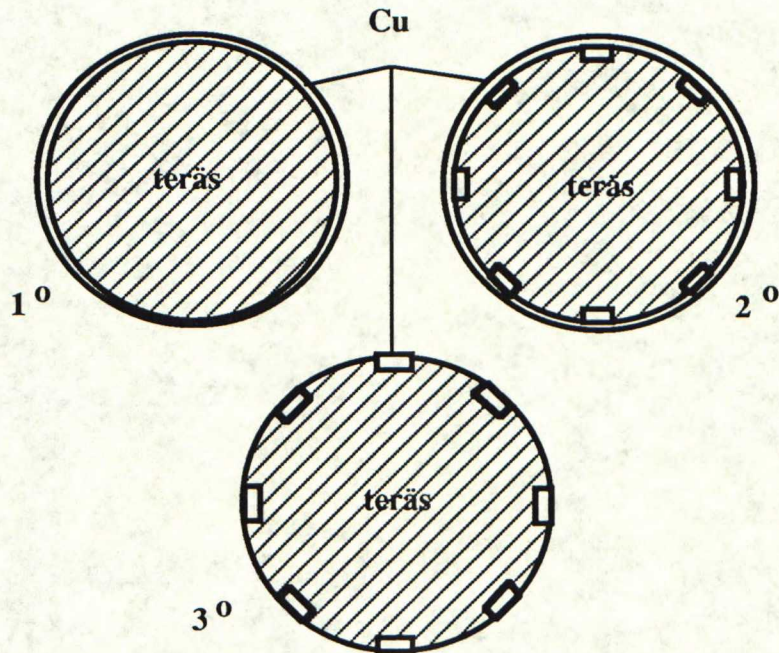
2.1 Tutkittavien moottoreiden rakenne

Staattori

Aluksi suunnitellaan yksi staattori, jota pidetään lähtökohtana molemmille moottorivaihtoehdoille. Staattori on levyrakenteinen. Suljetun staattoriuran haittana on, että magneettivuo pääsee sulkeutumaan ilmapälin ja uran väliin jäävää kannasta pitkin, jolloin hajavuo kasvaa. Tästä syystä staattoriurana käytetään avouraa, joka suljetaan magneettisesti johtamattomalla urakiilalla. Tarkempi mitoitus esitetään myöhemmin.

Oikosulkukoneen roottori

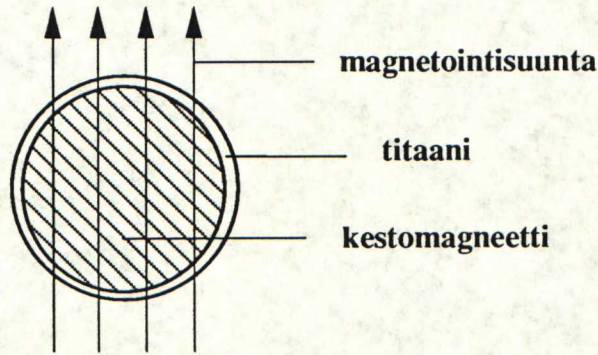
Oikosulkukoneen roottorin täytyy suuresta pyörimisnopeudesta johtuen olla massiivirakenteinen, sillä riittävän hyvin tasapainotetun levyrakenteisen roottorin valmistaminen on hyvin vaikeaa. Tässä tarkastellaan kolmea rakennetta, joissa sydän on akseliterästä ja sen ympärillä on eri tavoin muotoiltu 'kuparihäkki'. Tarkoituksena on tutkia, mikä kolmesta vaihtoehdosta synnyttää suurimman vääntömomentin, ja verrata parasta rakennetta kestopagneettiroottoriin.



Kuva 2.1. Tutkittavien oikosulkuroottoreiden geometriat.

Kestomagneettikoneen roottori

Roottorin rakenne on hyvin yksinkertainen: sydämenä on yhdensuuntaisesti magnetoitu kestopagneettitanko ja sitä ympäröi titaanipanta.



Kuva 2.2. Kestomagneettiroottorin geometria.

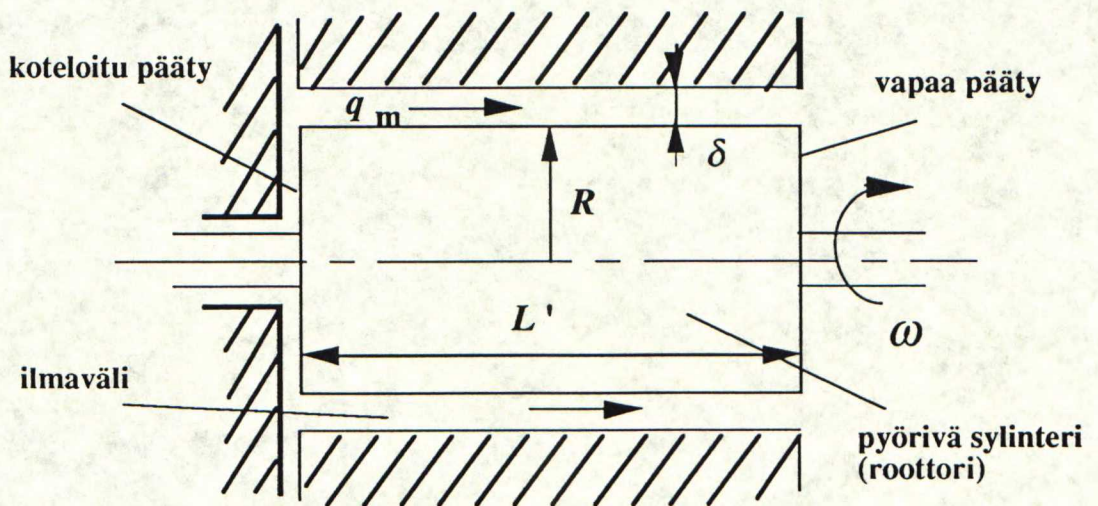
2.2 Mekaaninen mitoitus

2.2.1 Vedestä aiheutuvat mekaaniset häviöt

Pyörivää kappaletta ympäröivässä väliaineessa muodostuu kitkahäviöitä, jotka riippuvat väliaineen ominaisuuksista, pyörimisnopeudesta, kappaleen geometriasta ja pinnan karheudesta. Riittävän suurella pyörimisnopeudella väliaineen virtaus on turbulentti.

Sähkökoneen roottori

Suurnopeuskoneen roottori pyörii suljetussa tilassa, ja sitä ympäröivä väliaine voi olla joko kaasua tai nestettä; tässä tapauksessa roottorin ympärillä on vettä.



Kuva 2.3. Yksinkertaistettu roottorin malli.

Kitkahäviöiden laskemiseksi kuvan 2.3 rakenne voidaan jakaa osiin, joissa roottorin päädyt ja ilmväli kuvataan erikseen. Tällöin päädyt esitetään pyörivänä kiekkona ja muu osa roottoria pyörivänä sylinterinä. Näiden ympäri kulkee virtausaineen massavirta.

Kitkahäviöt roottorin päissä

Virtausmekaniikassa väliaineen virtausvastusta kuvaa dimensioton Reynoldsin luku, jonka suuruudesta voidaan päätellä, onko virtaus laminaari vai turbulentti. Pyörivän kiekon tapauksessa Reynoldsin luku lasketaan kaavasta

$$Re_r = \frac{\rho \omega R^2}{\mu}. \quad (1)$$

Ympyrälevyn pyöriessä tasossaan virtaus muuttuu turbulenttiseksi, kun $Re_r > 3 \cdot 10^5$ (Tekniikan käsikirja 1 s. 225).

Kitkahäviöiden laskennassa tarvittava momentin vastuskerroin C_T riippuu siitä, ovatko kiekon päädyt vapaat vai koteloidut. Turbulenttisessa virtauksessa saadaan *vapaalle kiekolle*

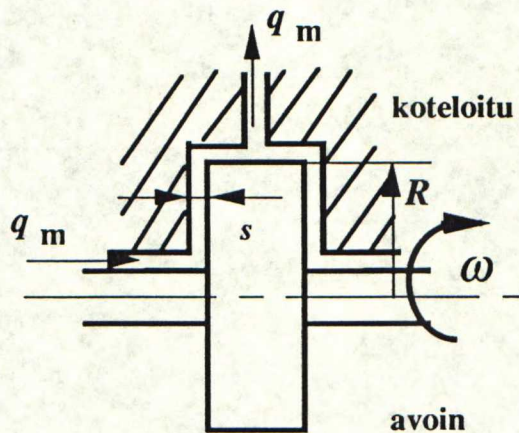
$$C_T = \frac{0.146}{Re_r^{0.2}} \quad (2)$$

ja *koteloidulle kiekolle*

$$C_P = \frac{0.134}{Re_r^{0.246}} \left(\frac{s}{R} \right)^{0.0655}. \quad (3)$$

Yhdessä kiekon puoliskossa aiheutuva kitkateho on

$$P_{fp} = \frac{1}{2} \rho \omega^3 R^5 C_T. \quad (4)$$



Kuva 2.4. Roottorin päädyt voidaan kuvata pyörivänä kiekkona, jonka kulmanopeus on ω .

Kitkahäviöt ilmapälissä

Ilmapälän kitkahäviöiden laskemiseksi tarkastellaan kuvan 2.5 mukaista tapausta, jossa Reynoldsin luku lasketaan (Polkowski 1984)

$$Re_{\tau} = \frac{\rho \omega R \delta}{\mu} . \quad (5)$$

Kun $10^5 < Re_{\tau} < 10^6$, momentin vastuskerroin ilmapälissä lasketaan kaavasta

$$C_{\tau} = \frac{0.0105}{Re_{\tau}^{0.193}} K. \quad (6)$$

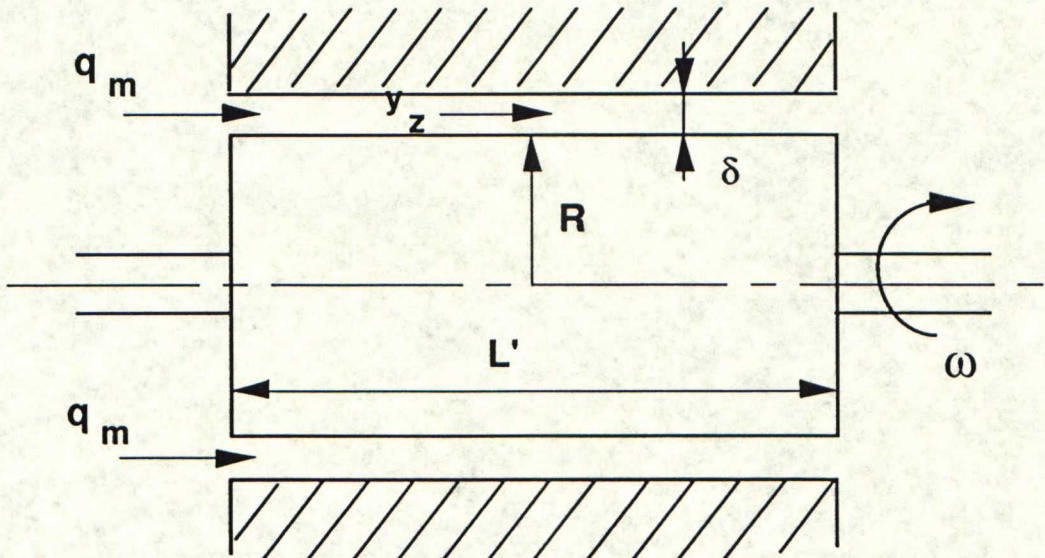
Kerroin K ottaa huomioon pintojen epätasaisuuden, joka vaikuttaa oleellisesti kertoimen C_{τ} arvoon. Pinnankarheuden, esimerkiksi roottorin urituksen, vaikutuksen teoreettinen laskeminen on vaikeaa, ja K onkin määritettävä mittausten perusteella. Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa useita vuosia käynnissä olleen suurnopeus-tekniikka -projektin yhteydessä on suoritettu näitä mittauksia. Rakennetulla pienoiskoelaitoksella, jossa staattori ja roottori ovat uritettuja, on saatu K:n arvoksi noin 2,5 useammalla eri mittaustavalla. Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin vain sileäpintaisia kappaleita, ts. sekä staattori että roottori ovat esimerkiksi holkitettuja, jolloin voidaan käyttää arvoa $K=1,0$. Tähän on päädytty, jotta muutenkin suuret vesikitkahäviöt voidaan pitää kohtuullisina.

Turbulentsisessa virtauksessa väliaineen vastuksesta aiheutuva häviöteho on

$$P_{f\tau} = \pi \rho \omega^3 R^4 L' C_{\tau}. \quad (7)$$

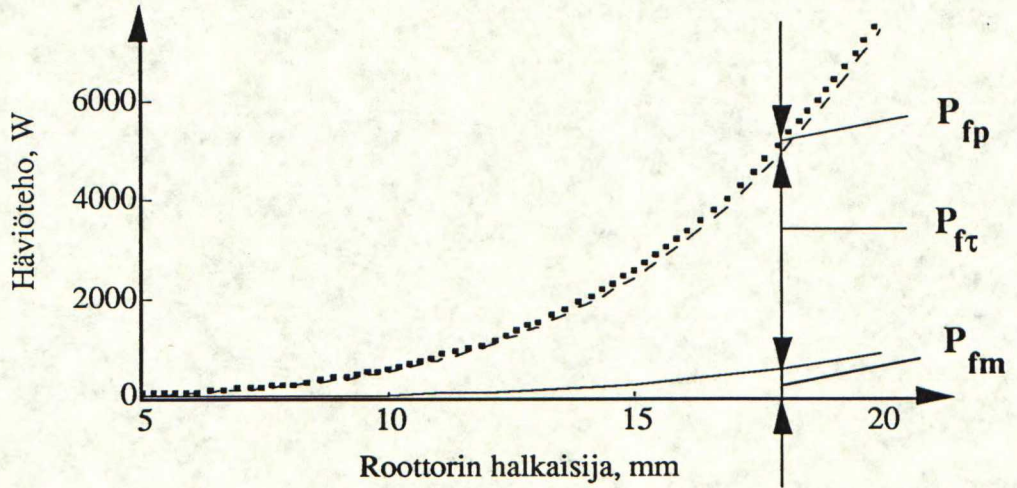
ja väliaineen partikkelien liikemäärän kasvusta aiheutuva lisähäviö on

$$P_{fm} = 0.48 q_m \omega^2 R^4. \quad (8)$$



Kuva 2.5. Sylinteripinta ilman päätyjä kuvaa moottorin ilmapäliä.

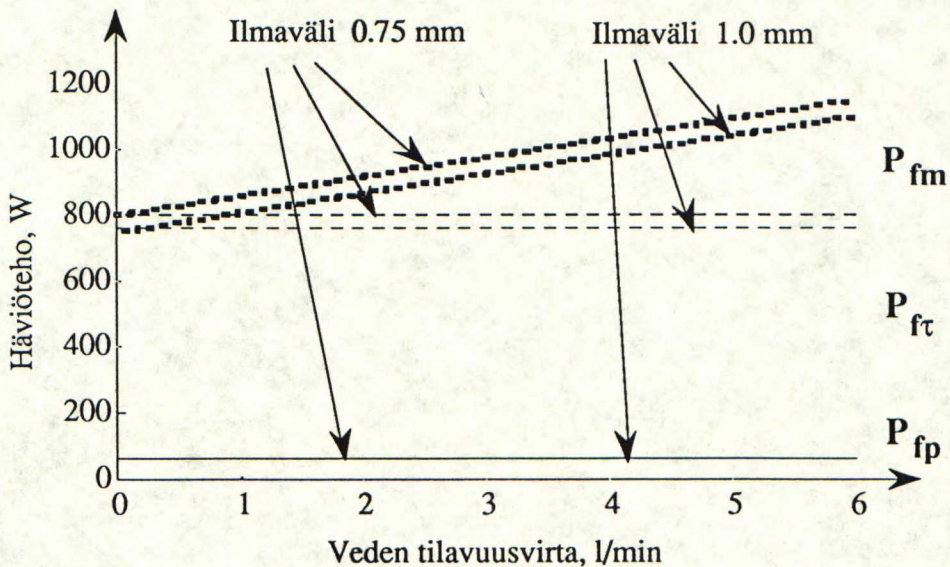
Edellä esityt kaavat pätevät sekä kaasuille että nesteille, kunhan virtaus on turbulentti. Niiden mukaan kitkahäviöt riippuvat voimakkaasti roottorin säteestä ja pyörimisnopeudesta sekä jonkin verran roottoria ympäröivästä väliaineesta, joka nyt on vettä. Vesi lämpenee häviöiden vaikutuksesta, jolloin sen ominaisuudet ja niiden myötä kitkahäviöt muuttuvat vaikka geometria pysyisi samana. Tämä vaikuttaa häviötehoon kuitenkin melko vähän.



Kuva 2.6. Vedestä aiheutuvat kitkahäviöt roottorin halkaisijan funktiona. Pyörimisnopeus on 150 000 r/min, ja vesi on lämpötilassa 50°C.

Kuvan 2.6 käyrät on saatu arvoilla $L'=60,0$, $\delta=0,75$ mm, $s=0,1$ mm ja $q_v=1,2$ l/min. Tässä $Re_r=1,23 \cdot 10^6$ ja $Re_\tau=1,68 \cdot 10^5$, joten virtaus täyttää turbulenttisuudelle asetetut vaatimukset. Roottorin halkaisijalla $D_r=11,0$ mm häviöitä muodostuu 800 W.

Suurin häviö syntyy staattorin ja roottorin välisessä tilassa (kuva 2.6). Tämä poikkeaa muista suurnopeuskoneista, joissa merkittävin häviökomponentti on massavirran aiheuttama. Mikäli ilmaväliin johdettavaa vesimäärää kasvatetaan, siitä aiheutuvan häviötehon suhteellinen osuus kuitenkin kasvaa.



Kuva 2.7. Ilmavälissä kulkevan veden tilavuusvirran vaikutus kitkahäviöihin, kun roottorin halkaisija $D_r=11,0$ mm.

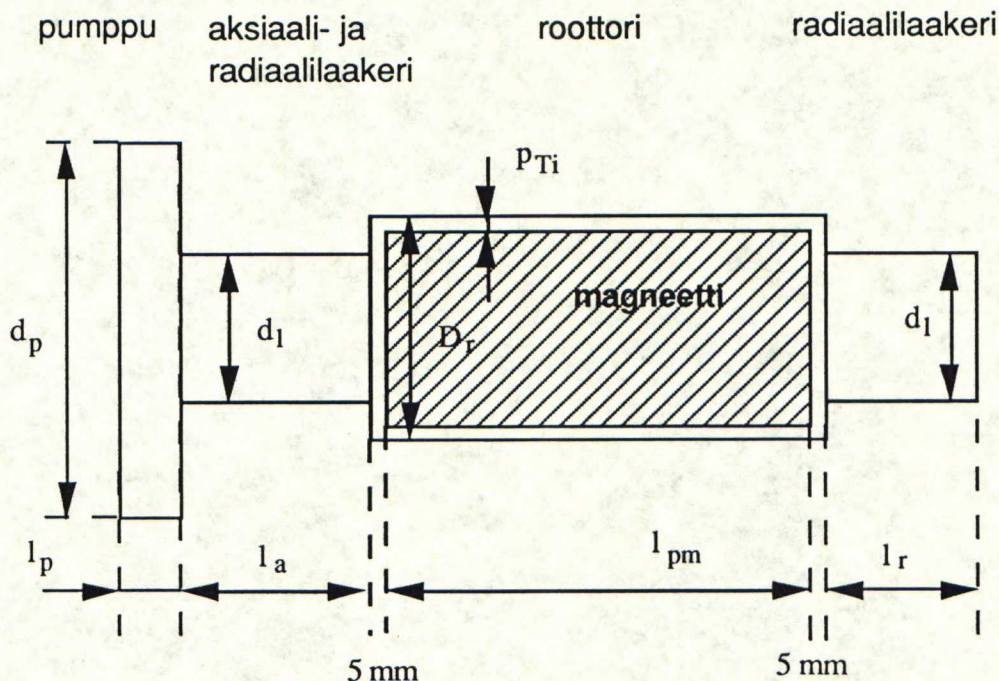
Suunniteltavan moottorin akselitehon on oltava vähintään 4,2 kW. Jotta hyötysuhde pysyisi kohtuullisena, moottorin kitkahäviöt eivät saa ylittää 25 % (noin 1 kW). Mikäli koko vesimäärä $q_v=5,25$ l/min johdetaan ilmavälin kautta, kitkahäviöitä muodostuu 1,1 kW, kun roottorin halkaisija $D_r=11$ mm ja ilmaväli $\delta=0,75$ mm.

Roottorin halkaisija määräytyy kitkahäviöiden perusteella. Halkaisijan kasvaessa häviöt lähtevät jyrkkään nousuun ja tehokkaimmin ne pidetäänkin kohtuullisina siten, että pyritään mahdollisimman pieneen halkaisijaan.

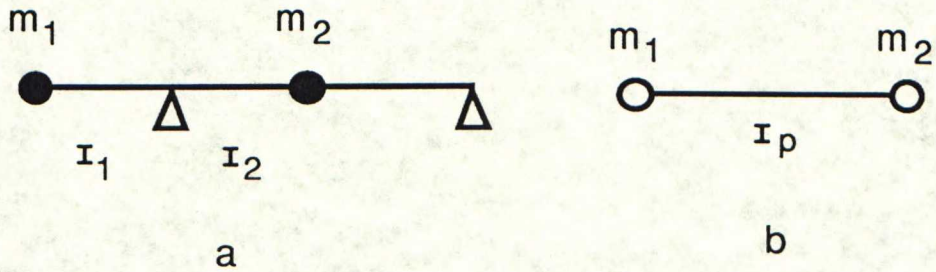
2.2.2 Roottorin lujuustekninen mitoitus

Roottorin halkaisijan pienentäminen heikentää rakennetta, sillä halkaisijan kasvaessa roottorin jäykkyys lisääntyy. Pitkän, ohuen roottorin ensimmäinen taivutuskriittinen taajuus saattaa laskea lähelle suunniteltua pyörimisnopeutta vastaavaa taajuutta tai jopa sen alle.

Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun tutkijan Jukka Seppäsen mukaan sähkömoottorin ja pumpun yhteisen akselin kriittiset ominaistajuudet voidaan laskea likimääräisesti seuraavalla tavalla. Kuvan 2.8 mukainen rakenne, joka vastaa kestopagneetti-roottorin geometriaa, idealisoidaan kahden massapisteen systeemiksi. Sen avulla lasketaan sekä taivutusmuodon että vääntömuodon alin ominaistajuus. Kuvan 2.9 mallissa m_1 on roottorin massa ja m_2 on summa pumpun juoksupyörän massasta ja osasta akselin massaa.



Kuva 2.8. Kestomagneettimoottorin ja pumpun roottorin yksinkertaistettu rakenne.

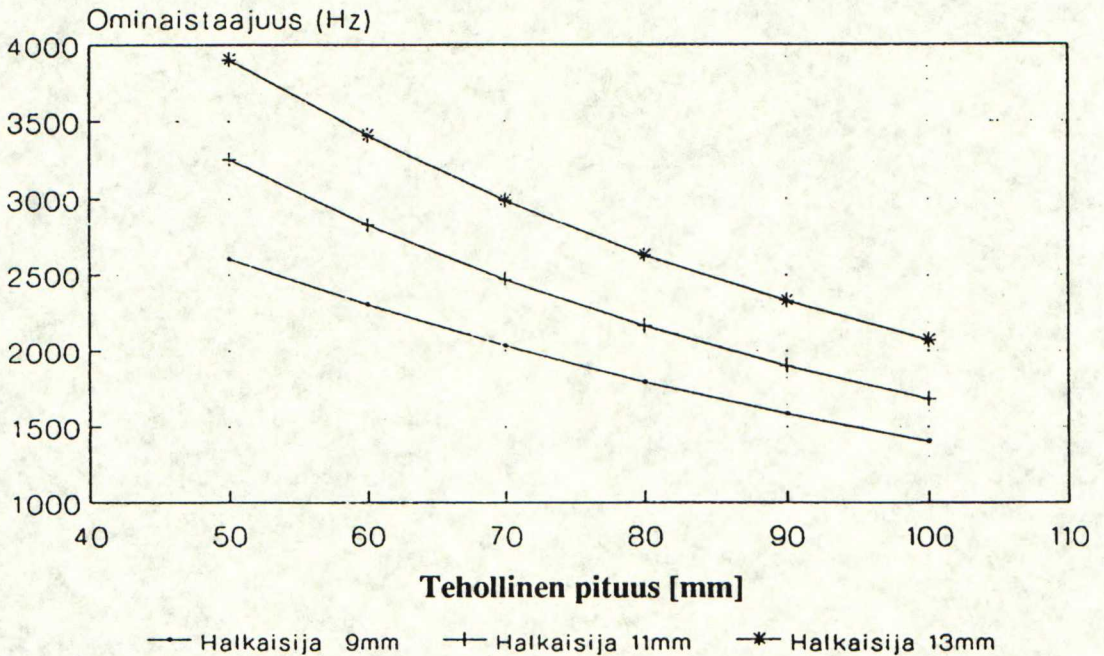


Kuva 2.9. Roottorin idealisointi a) taivutusmuotojen ja b) vääntömuotojen laskemiseksi.

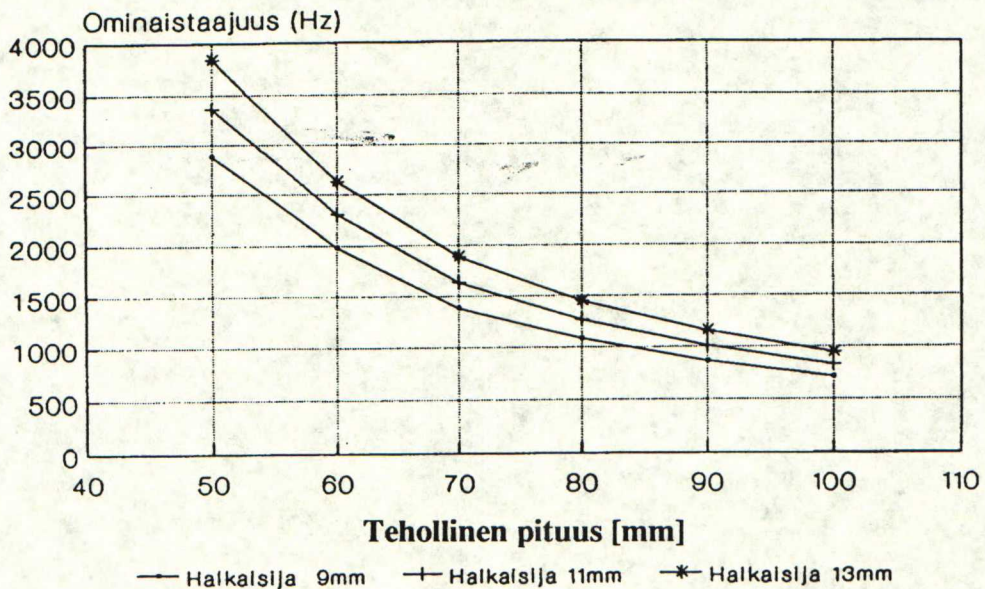
Menetelmänä käytetään staattisen taipuman menetelmää, joka antaa 10-20% liian suuria ominaistajuuksia. Laskennassa tämä otetaan huomioon käyttämällä todellista suurempia pistemassoja, mikä alentaa ominaistajuuksia. Myös laskettavat neliömomentit ovat vain arvioita todellisuudesta, mikä osaltaan vaikuttaa menetelmän likimääräisyyteen. Saatavat tulokset ovat kuitenkin suuruusluokaltaan oikeita ja täysin käyttökelpoisia arvioitaessa rajoja roottorin mitoille.

Seppäsen laskelmien mukaan taivutusmuodon alin ominaistajuus on noin kaksi dekadia pienempi kuin vääntömuodon, jolloin edellinen tulee määrääväksi. Suoritettujen laskelmien perusteella ominaistajuus on melko riippumaton magneettia ympäröivän pinnan paksuudesta. Seinämän ohentaminen nostaa ominaistajuutta noin 20 Hz/mm, mikä johtuu siitä, että magneetin kimmomodulin arvo on laskennassa ollut suurempi kuin pantamateriaalin (titaani). Käytännössä magneettimateriaali ei liene kantavuudeltaan yhtä hyvä kuin titaani ja todelliset ominaistajuudet ovat hieman laskettuja alhaisempia. Laskentaa suoritettaessa ei kuitenkaan ollut parempia lujuusarvoja käytettävissä.

Kuvassa 2.10 on esitetty ominaistajuuskäyrästä kestmagneettiroottorille, jossa titaanipinnan paksuus $p_{Ti}=2,0$ mm. Ominaisajuus on laskettu koko akselin pituuden funktiona, vaikka kuvassa 2.10 vaaka-akselilla on vain magneetin pituus.



Kuva 2.10. Kestomagneettiroottorin ominaistajuuksien riippuvuus halkaisijasta ja pituudesta.



Kuva 2.11. Massiivista akseliterästä olevan oikosulkuroottorin ominaistaajuuksien riippuvuus halkaisijasta ja pituudesta.

Kuvassa 2.11 on käyrästä akseliterästä olevalle oikosulkuroottorille. Kuvien 2.10 ja 2.11 perusteella roottorityyppien ominaistaajuudet eivät poikkea merkittävästi toisistaan. Oikosulkuroottorin ominaistaajuudet ovat pienempiä kuin kestopagneettiroottorin osittain siitä syystä, että laskennassa roottoreiden muoto on ollut sama. Tämä muoto on edullinen kestopagneettiroottorille mutta ei paras mahdollinen massiiviselle oikosulkuroottorille.

Suunniteltavan kestopagneettimoottorin pyörimisnopeus vastaa taajuutta $f_2=2500$ Hz. Mikäli roottorin halkaisijana pidetään $D_r=11.0$ mm ja moottorin tehollinen pituus kestopagneettimoottorilla ylittää 70 mm, joudutaan lähelle kriittistä pyörimisnopeutta, joka on toimintapisteinä mahdoton. Oikosulkumoottorilla syöttötaajuus on $f_1=2600$ Hz ja kriittinen taajuus sähköiseltä pituudeltaan 60 mm roottorilla on lähellä tätä arvoa.

Sähköisessä mitoituksessa tutkitaan halkaisijaltaan 11 mm roottoria ja moottorin teholliseksi pituudeksi otetaan 60 mm. Valmistettavan koemoottorin mitoitukselta varten roottorin pituus voidaan valita saatavien tulosten perusteella ottaen huomioon sen ominaistaajuudet. Ratkaisuna voisi esimerkiksi kasvattaa roottorin kokonaispituutta, jolloin päästään selvästi ylikriittiselle alueelle. Todennäköisesti ylikriittisyys ei aiheuta ylitsepääsemättömiä ongelmia, koska roottorin hitausmomentti on pieni ja se voidaan ajaa nopeasti kriittisen nopeusalueen yli. Lisäksi ympärillä oleva vesi vaimentanee värähtelyjä.

Akseliteräs kestää esiintyvät jännitykset, mikäli siihen ei ole syntynyt säröjä esimerkiksi valmistusvaiheessa. Magneettimateriaalin lujuustekniset ominaisuudet eivät ole tarkasti tiedossa, joten siinä esiintyviä jännityksiä ei voida tarkasti laskea, vaan magneetin kestävyys täytyy todeta koekappaleen avulla. Myös magneetin geometria vaikuttaa lujuuteen. Tässä työssä tutkitaan ainoastaan roottorirakennetta, jonka sydämenä on tankomainen kestopagneetti. Tarkoituksena on selvittää oikosulku- ja kestopagneettimoottorin periaatteellinen soveltuvuus käsiteltävään käyttötilanteeseen. Magneetin lopullinen muoto on valmistustekninen ongelma.

2.2.3 Tarvittava vääntömomentti

Moottorin vääntömomentti lasketaan akselitehosta ja pyörimisnopeudesta

$$T_N = \frac{P_a}{2\pi n} . \quad (9)$$

Moottorin pyörittämä pumppu vaatii mekaanisen tehon $P_p=4.2$ kW. Tämän lisäksi moottorin akselitehosta otetaan kitkahäviöihin kuluva teho, joka 11 mm roottori-halkaisijalla on $P_f=800$ W. Tarvittava mekaaninen teho on siis

$$P'_m = P_p + P_f = 4.2 \text{ kW} + 0.8 \text{ kW} = 5.0 \text{ kW}.$$

Moottorin vääntömomentin määrittämiseksi tähän lisätään 20 % varmuusmarginaali mm. laakereissa esiintyvien vastusvoimien huomioon ottamiseksi, jolloin akselitehoksi tulee

$$P_a = 1.2 P'_m = 6.0 \text{ kW}.$$

Kaavasta (9) saadaan $T_N = 0,38$ Nm, jota pidetään mitoitusarvona.

2.3 Sähkömagneettinen mitoitus

Perinteisen sähkökoneen suunnittelun tehtävänä on määrittää teknilliset ja taloudelliset vaatimukset täyttävän koneen yksityiskohtainen rakenne. Koneen mitat ja ominaisuudet määräytyvät tunnetuista lähtötiedoista ja noin 30-40 muuttujasta. Tavoitteeseen pyritään valitsemalla useimmille muuttujille vakioarvo, jonka ympärillä ne vaihtelevat todellisuudessaakin melko vähän, ja optimoimalla lopuksi jäljelle jäävät vajaa kymmenen muuttujaa, jotka vaikuttavat mitoitukseen eniten. (Vogt 1983)

Usein suunnittelun lähtökohtana pidetään hyvin suunniteltujen sähkökoneiden arvoista saatavia rajoituksia vuontiheydelle koneen rautaosissa ja ilmapälissä sekä virrantiheydelle staattori- ja roottorikäämityksissä. Koneen päämittojen eli ilmapälialkaisijan D ja staattorin levysydämen tehollisen pituuden L' valinnassa käytetään hyväksi kaavaa (10), jonka mukaan tarvittava roottorin tilavuus on verrannollinen vaadittavaan vääntömomenttiin

$$T = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{C}{2\pi} D^2 L'. \quad (10)$$

Kaavassa esiintyvä konevakio C on sitä suurempi, mitä tehokkaammin roottorin tilavuus on käytetty hyväksi. Se valitaan kirjallisuudesta löytyvien käyrästöjen perusteella. Seuraavaksi lasketaan ilmapäli eri konetyypeille muodostetuista kokemuseräisistä yhtälöistä. Tästä eteenpäin suunnittelu etenee portaittain siten, että vuorotellen valitaan arvo tietyllä suurella ja sen perusteella lasketaan muita suureita ja tarvittaessa käytetään takaisinkytkentöjä. Suunnittelu perustuu siis aikaisemmin suunniteltujen ja rakennettujen koneiden mittoihin ja ominaisuuksiin. Lopputulos riippuu voimakkaasti siitä, kuinka hyviä valintoja matkalla on tehty ja kuinka hyvin käsillä olevaan tarkoitukseen suunniteltava kone on verrattavissa aikaisempiin koneisiin.

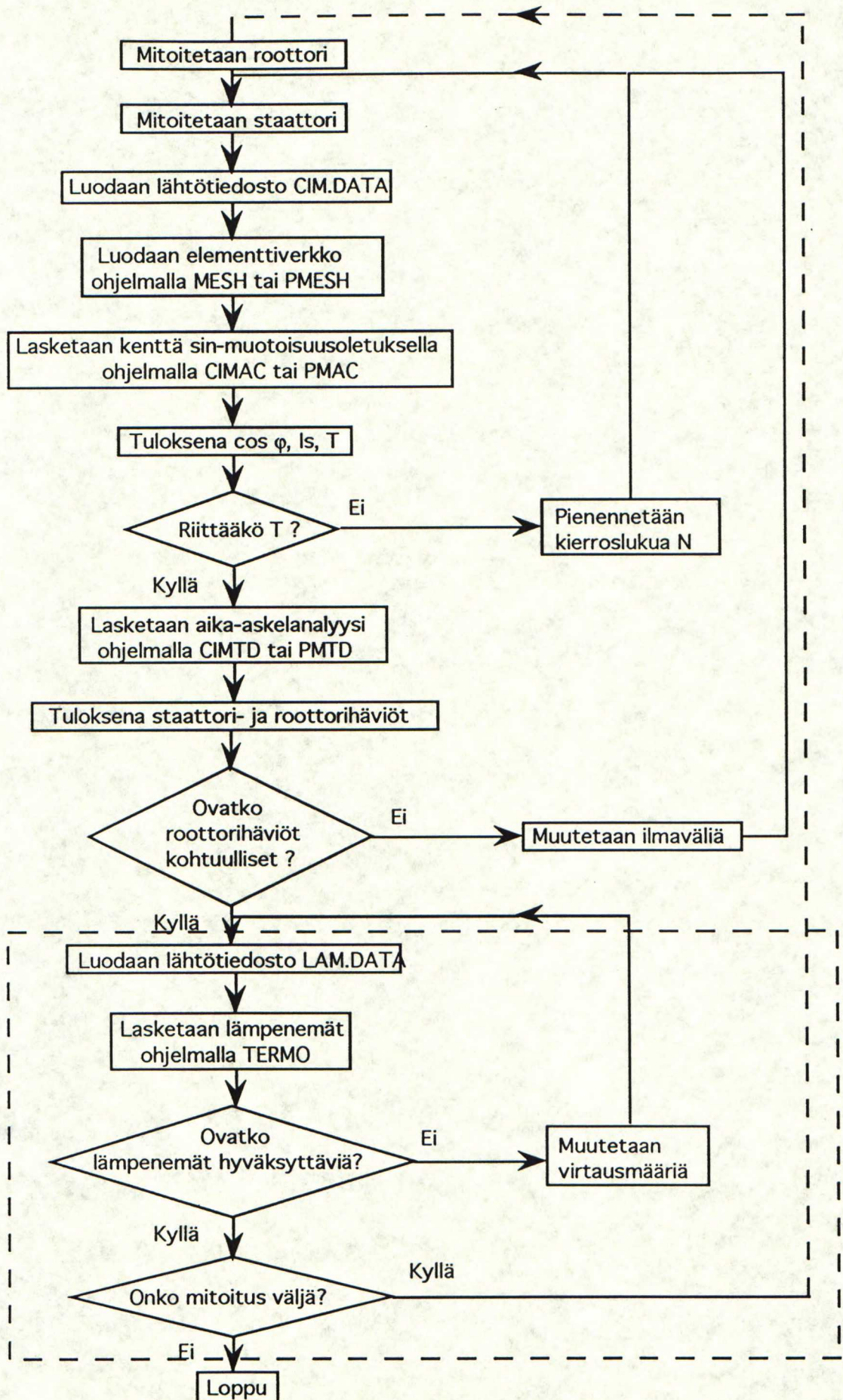
Suurnopeuskoneen suunnittelussa ei voida käyttää perinteisille koneille sopivia konevakioita. Lähtötiedoista mm. nimellisjännite on valittavissa ainakin tietyissä rajoissa. Edelleen kentälaskentaan perustuvia tietokoneohjelmia apuna käytettäessä suunnittelu eroaa perinteisestä sähkökoneen suunnittelusta.

2.3.1 Mitoituksen kulku

Mitoituksessa käytettävä, kentälaskentaan perustuva ohjelmisto tarvitsee lähtötietoina simuloitavan moottorin geometriset mitat ja materiaalitiedot sekä staattorikäämin määrittelevät oleelliset tiedot mm. resistanssin ja vyyhdenpään induktanssin. Ohjelmisto ratkaisee kaksiulotteisen magneettikentän koneen poikkileikkaustasossa ja antaa tuloksena moottorin ominaisuuksia kuten vääntömomentti, tehokerroin, häviöt jne.

Tietokoneella suoritettavan laskennan lähtökohtamitoitus suunnitellaan perinteisen suunnittelun keinoin. Pienestä roottorin ulkohalkaisijasta johtuen staattorin sisähalkaisija on pieni, mikä rajoittaa uran ja hampaan mittojen valintaa. Roottorin ulkoiset mitat on kiinnitetty mekaanisten vaatimusten perusteella mutta sisäisellä rakenteella voidaan vaikuttaa moottorin ominaisuuksiin. Sen sijaan staattorille ei juuri ole asetettu rajoituksia ja se on suunniteltava alusta lähtien.

Sähkömagneettisen mitoituksen kulku on pääpiirteissään kaavion 1 mukainen (seuraavalla sivulla).



Kaavio 1. Sähkömagneettisen mitoituksen kulku. Katkoviivalla rajattu osa sekä takaisinkytkentä koskevat vain kestopagneettimoottoria.

2.3.2 Staattorin alustava mitoitus

Staattorista tehdään ensimmäinen mitoitus perinteiseen oikosulkumoottorin suunnittelun kulkuun perustuen. Tässä esitetään aluksi teoriaa ja kaavoja, joiden perusteella varsinainen mitoituslaskenta tehdään. Sen jälkeen valitaan moottorin vaatimusten täyttämiseksi välttämättömiä suureita, jotka muodostavat suunnittelun perustan. Mitoitus on luonteeltaan suuntaa-antava, eräänlainen iteraation alkupiste ja sen aikaansaamiseksi on monille suureille valittava arvoja esimerkiksi kirjallisuuteen perustuvina arvioina ja likimääräistyksinä. Lopuksi esitetään laskenta, jonka edetessä tehdyt valinnat perustellaan. Käytettävä teoria on lähteestä (Vogt 1983).

Teoria

Moottorin vääntömomentti riippuu staattorin käämivuosta ja staattorivirrasta

$$T_e = mp \Psi_{hs} I_s \sin \alpha, \quad (11)$$

missä α on virran ja vuon välinen kulma. Käämivuo riippuu ilmavälin vuontiheydestä seuraavasti

$$\hat{\Psi}_{hs} = \frac{k_w}{p} q D L' N_c \hat{B}_\delta, \quad (12)$$

missä N_c on staattorikäämin vyyhden kierrosluku. Tästä voidaan johtaa yhtälö staattorijännitteen ja vuontiheyden välille

$$\hat{B}_\delta = \frac{U_{sv} \sqrt{2}}{k_w q \omega D L' N_c}. \quad (13)$$

Mikäli staattorijännite pidetään vakiona, kierrosluvun pienentäminen kasvattaa ilmavälivuontiheyttä kaavan (13) mukaisesti ja pienentää samalla staattoriresistanssia. Tällöin koneen vuon ja staattorivirran kasvun ansiosta vääntömomentti suurenee. Ts. alustavan mitoituksen antamaa momenttia voidaan kasvattaa kierroslukua pienentämällä.

Staattoriuran poikkipinnan määrittämiseksi on arvioitava virran suuruus. Mitoituksen perustaksi valittava staattorivirta lasketaan kaavasta

$$I_s = \frac{P_a}{m U_{sv} \eta \cos \varphi}. \quad (14)$$

Staattorijohtimen poikkipinta-ala määräytyy virrantiheydestä ja staattorivirrasta

$$A_{js} = \frac{I_s}{J_s}. \quad (15)$$

Staattoriuran poikkipintaa laskettaessa johtimien eriste ja muoto otetaan huomioon kuparin täyttekertoimella f_{Cu}

$$A_{us} = \frac{N_c}{f_{Cu}} A_{js}. \quad (16)$$

Riittävän pinta-alan saavuttamiseksi on otettava huomioon, että valittavien mittojen, uran ja hampaan leveys, tulee pysyä urajaon sisällä

$$\tau = \frac{\pi D}{Q}. \quad (17)$$

Staattoriselän korkeus määritetään staattoriselän vuon avulla. Staattoriselän vuo riippuu selän poikkipinnasta ja siinä vallitsevasta vuontiheydestä

$$\hat{\Phi}_s = f_{Fe} L' h_s \hat{B}_s. \quad (18)$$

Usein selän kautta arvioidaan kulkevan puolet perusaallon vuosta ja yliaaltojen vaikutus jätetään ottamatta huomioon. Suuresta syöttötaajuudesta johtuen yliaaltojen osuus vuosta on huomattavasti suurempi kuin perinteisillä koneilla. Tästä syystä selän vuohon lasketaan mukaan kolmannen yliaallon vuo olettaen, että sen huippuarvo on kolmasosa perusaallon vuon huippuarvosta, jolloin saadaan

$$\hat{\Phi}_s = \frac{1}{2}(\hat{\Phi}_1 + \hat{\Phi}_3) = \frac{1}{2}\left(\hat{\Phi}_1 + \frac{1}{3}\hat{\Phi}_1\right) = \frac{2}{3}\hat{\Phi}_1. \quad (19)$$

Arvio on suurehko, mutta sillä pyritään ottamaan huomioon myös muiden yliaaltojen vaikutusta. Kaavassa (19) kerroin $1/2$ johtuu siitä, että päävuo jakautuu staattoriselässä kahteen suuntaan. Perusaallon vuo yhden navan kohdalla lasketaan seuraavasti

$$\hat{\Phi}_1 = \frac{DL'}{p} \hat{B}_\delta. \quad (20)$$

Yhdistämällä kaavat (18), (19) ja (20) saadaan selän korkeudeksi

$$h_s = \frac{2D\hat{B}_\delta}{3pf_{Fe}\hat{B}_s}. \quad (21)$$

Staattorikäänin tasavirtaresistanssi lasketaan kaavasta

$$R_t = qN_c \frac{l_m}{\gamma A_{js}}. \quad (22)$$

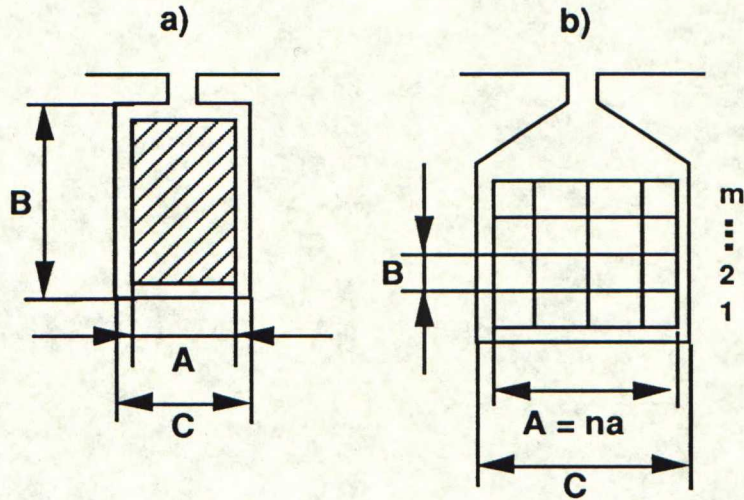
Koska kierrosluvun muuttaminen muuttaa uran poikkipintaa ja uuden uran mitat on joka tapauksessa laskettava ohjelman syöttötiedoksi, käänin resistanssi lasketaan tässä uran poikkipinnan avulla

$$R_t = \frac{qN_c^2 l_m}{\gamma f_{Cu} A_{us}}. \quad (23)$$

Pituus l_m yhden johdinkierroksen keskimääräinen pituus.

Suurnopeuskoneissa suuri syöttötaajuus kasvattaa virranahtoa staattorijohtimissa merkittävästi perinteisiin koneisiin verrattuna. Virranahto voidaan laskennassa ottaa huomioon virranahtokertoimella k_R , joka kuvaa vaihto- ja tasavirtaresistanssin suhdetta

$$k_R = \frac{R_s}{R_t}. \quad (24)$$



Kuva 2.12. Merkintöjä redusoidun johdinkorkeuden laskemiseksi, kun urassa on a) yksi sauvu, b) n riviä, joissa jokaisen johtimen mitta on a, ja m sauvakerrosta.

Urassa esiintyvän virranahtoon laskemiseksi on määritettävä redusoitu johdinkorkeus, jonka lausekkeeksi tulee (Jokinen 1982) kuvan 2.12 merkinnöillä

$$\xi = B \sqrt{\omega \mu_0 \gamma \frac{A}{2C}}, \quad (25)$$

missä $A=na$ ja γ on johdinmateriaalin (Cu) johtavuus. Nyt saadaan kuvan 2.12 mukaisen rakenteen keskimääräiseksi resistanssisuhteeksi pyöröjohtimella (Jokinen 1982)

$$k_{Ru} \approx 1 + 0.59 \frac{m^2 - 0.2}{9} \xi^4, \quad (26)$$

missä m on urassa päällekkäin olevien johtimien lukumäärä.

Vyyhdenpäiden virranahto on usein mitättömän pieni, mikä otetaan tässä huomioon käyttämällä sille kerrointa $k_{Rs}=1,0$. Koko käämin keskimääräinen resistanssisuhde on (Jokinen 1982)

$$k_R = k_{Ru} \frac{l_m - 2l_s}{l_m} + k_{Rs} \frac{2l_s}{l_m}, \quad (27)$$

missä l_s on vyyhdenpään keskimääräinen pituus. Vaihtovirtaresistanssi, R_s , tarkasteltavalla taajuudella saadaan nyt kaavasta (24).

Vyyhdenpään reaktanssin määrittäminen on vaikeaa. Se riippuu käämitystavasta, vyyhdenpään muodosta ja ympäröivistä koneen osista (Vogt 1983). Oletetaan vyyhdenpää puolipyörän muotoiseksi johdinnipuksi, joka sijaitsee rautalevyistä kootun pakettin läheisyydessä. Induktanssille on voimassa

$$L = N_c^2 \Lambda = N_c^2 \frac{BA}{N_c I} = \frac{\mu_0 H N_c A}{I}, \quad (28)$$

missä $A=\pi r^2$ on puolipyörän pinta-ala ja r säde. Tämä johtuu siitä, että johdinnipun peilikuva on raudan läheisyydestä johtuen otettava huomioon. Sijoitetaan tähän magneettikentän kentänvoimakkuuden lauseke

$$H = \frac{N_c I}{2\pi r} \quad (29)$$

ja kerrotaan induktanssi sähkökulmanopeudella, ω , jolloin saadaan vyyhdenpään reaktanssiksi

$$X_{\sigma w} = \frac{\omega}{2} \mu_0 N_c^2 r. \quad (30)$$

Kaavaa (30) käytetään konekohtaisessa mitoituksessa lähtötiedoston luomiseksi tarvittavan vyyhdenpään reaktanssin laskemiseen. Reaktanssi lasketaan taajuudella $f = 50\text{Hz}$, koska käytettävä simulointiohjelma laskee kutakin taajuutta vastaavan reaktanssin itse.

Laskenta

Pyörimisnopeudeksi on vaadittu $n=150\,000$ r/min. Moottorin vaiheluvuksi on yksinkertaisinta valita $m=3$. Jotta syöttötaajuus pysyy kohtuullisena, napapariluvuksi valitaan $p=1$. Syöttötaajuus riippuu moottorin tyypistä ja on oikosulkumoottorilla $f_1=2600$ Hz ja tahtinopeudella pyörivällä kestomagneettimoottorilla $f_2=2500$ Hz.

Staattorivirran suuren taajuuden vuoksi staattorilevyjen tulee olla ohuita ja häviölukujen kohtuullisen pieniä. Levymateriaaliksi valitaan Bochum HF 20.

Staattorin sisähalkaisijan määräävät roottorin halkaisija ja ilmaväli. Ilmavälissä on nyt vettä ilman sijaan, mikä huomioon ottaen voidaan ensimmäisenä arviona valita suurehko arvo $\delta=1,0$ mm. Sisähalkaisijaksi tulee siten $D=13,0$ mm.

Uraluku tulisi valita suureksi, jotta vuontiheysjakauma ilmavälissä muodostuisi mahdollisimman sinimuotoiseksi. Pieni koko rajoittaa kuitenkin uraluvun valintaa ja

käytännössä toteuttamiskelpoisin vaihtoehto on $Q=12$, jolloin vakoluku on $q=2$. Limikäämityksellä saadaan suurin käämikerroin $k_w=0,966$.

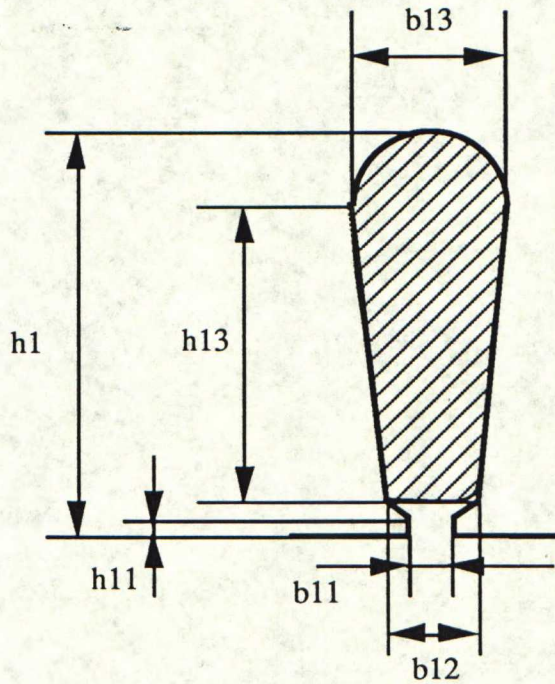
Staattorijännitteelle valitaan lähtöarvoksi $U_{sv}=220$ V, pääjännite $U_s=380$ V. Tämä on sopiva arvo oikosulkumootoria syöttävää taajuuden muuttajaa ajatellen.

Staattorikäämin kierrosluvun määrittämiseksi oletetaan ilmapäivävuontiheydeksi $B_8=0,7$ T. Kierrosluku ratkaistaan kaavasta (13), joka antaa esitetyillä arvoilla $N_c=18$.

Staattorivirran laskemista varten voidaan kaavassa (14) esiintyvaksi hyötysuhteeksi valita $\eta=0,90$. Tehokertoimen arvioiminen on vaikeampaa. Se riippuu ilmapäivälistä ja joko napakulman (kestomagneetikoneella) tai jättämän (oikosulkukoneella) suuruudesta sekä roottorin koosta. Halkaisijaltaan 11 mm roottori, jonka ympärillä on suuri ilmapäivä, tarvitsee suuren magnetointivirran, jotta riittävä vääntömomentti muodostuu. Tämä pienentää tehokerrointa. Kirjallisuuden perusteella (Pyrhönen 1984, Konstas 1980) voidaan esittää arvio $\cos \varphi=0,3$. Näin virraksi saadaan $I_s=43,8$ A.

Moottorin sisältämästä vedestä johtuen jäähditys on hyvä, joten virrantiheys voi olla suuri. Suoralla vesijäähdityksellä virrantiheys saa olla 13...18 A/mm² (Vogt 1983, taul. 13.4 s. 414). Valitaan virrantiheydeksi $J_s=15$ A/mm², jolloin johtimen pinta-alaksi saadaan $A_{js}=2,92$ mm².

Valmistetuissa suurnopeuskoneissa kuparin täytekerroin staattoriurassa on $f_{Cu}=0,35$. Tällöin uran poikkipinnaksi tulee $A_{us}=150$ mm². Staattorin uramuodoksi valitaan kuvassa 2.13 näkyvä pyörölangalle sopiva muoto.



Kuva 2.13. Staattorin uramuoto.

Urajako staattorin sisäpinnalla $\tau=3,4$ mm. Valitaan ura-aukoksi $b_{11}=1,4$ mm, jolloin hampaan leveydeksi jää $b_{z11}=2,0$ mm. Kuvassa 2.13 esitetyn uran pinta-ala voidaan laskea kaavasta

$$A_{us} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{b_{13}}{2} \right)^2 + \frac{b_{12}+b_{13}}{2} h_{13} . \quad (31)$$

Urajako 1 mm etäisyydellä ilmavälistä on $\tau_1 = 3,9$ mm. Valitaan uran kapeimman kohdan leveydeksi $b_{12} = 2,0$ mm, jolloin hampaan leveydeksi jää $b_{z12} = 1,9$ mm. Nyt on ratkaistava kahden muuttujan yhtälö

$$\frac{\pi \left(\frac{b_{13}}{2} \right)^2}{2} + \frac{2.0\text{mm} + b_{13}}{2} h_{13} = 150.0 \text{ mm}^2. \quad (32)$$

Taulukossa 1 on esitetty ratkaisu muutamalla b_{13} :n arvolla. Siinä uran korkeus, h_1 , on laskettu kaavasta

$$h_1 = 1.0\text{mm} + h_{13} + \frac{b_{13}}{2} \quad (33)$$

ja hampaan leveys uran leveimmän osan kohdalla, b_{z13} , on laskettu kaavasta

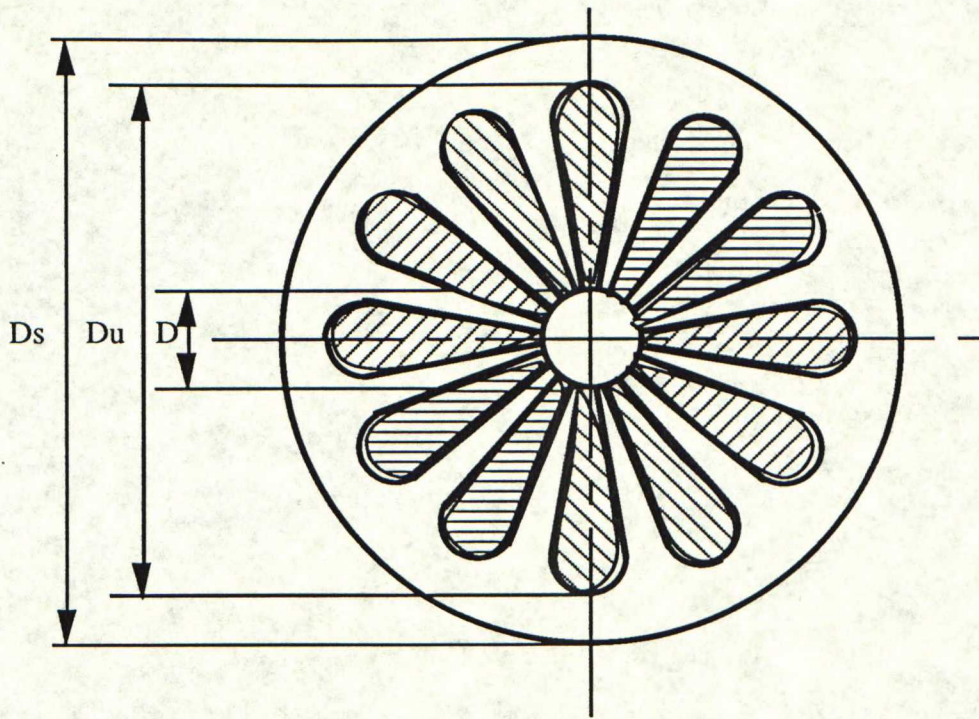
$$b_{z13} = \pi \frac{2.0\text{mm} + D + 2h_{13}}{Q} - b_{13}. \quad (34)$$

Taulukko 1. Kuvan 2.13 mukaisen poikkipinnaltaan 150 mm^2 staattoriuran mittoja.

b_{13} [mm]	h_{13} [mm]	h_1 [mm]	b_{z13} [mm]
8,0	25,0	30,0	9,0
9,0	21,5	27,0	6,2
10,0	18,5	24,5	3,6
12,0	13,4	20,4	-1,1

Staattorihampaan leveys määräytyy siis urajaon ja riittävän urapoikkipinnan saavuttamiseksi tarvittavien uran mittojen erotuksena. Simuloinnin lähtöpisteeksi valitaan taulukon 1 mitoista uran leveyttä $b_{13}=9,0$ mm vastaavat mitat, jotka vaikuttavat toteuttamiskelpoisimmilta. Kenttäratkaisun antamien vuontiheys- ja rautahäviöjakaumien perusteella voidaan uran mittoja muuttamalla vaihdella hampaan leveyttä.

Staattoriselän korkeuden määrittämiseksi oletetaan selän vuontiheydeksi varovaisesti $b_s = 1,1$ T. Levymateriaalin Bochum HF 20 täytekerroin $f_{Fe} = 0,95$. Selän korkeudeksi tulee laskemalla $h_s = 5,8$ mm. Valitaan selän korkeudeksi $h_s = 6,0$ mm, jolloin staattorin ulkohalkaisijaksi tulee $D_s = 79,0$ mm. Mittakaavaan 1:1 piirretty staattorin poikkileikkaus on kuvassa 2.14.

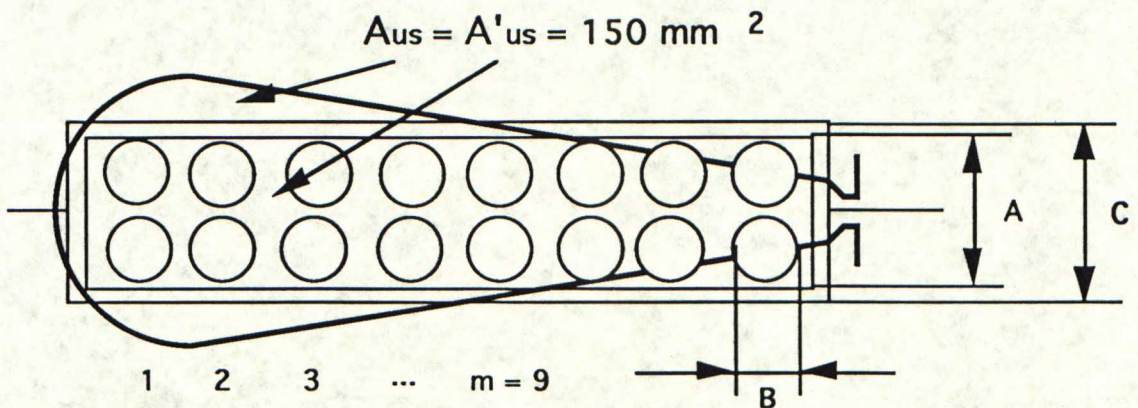


Kuva 2.14. Staattorin poikkileikkaus 1:1.

Staattoriresistanssin laskemiseksi vyyhdenpää oletetaan puolipyörän muotoiseksi, mikä ei täysin vastaa todellisuutta, koska vyyhdenpään on kierrettävä akseli. Tällä tavoin pituus voidaan kuitenkin määrittää yksinkertaisesti ja pessimistisenä arviona riittävällä tarkkuudella. Ympyrän halkaisijaksi otetaan staattorin halkaisija uran leveimmän osan kohdalla, jolloin johdinkierroksen pituudelle saadaan

$$l_m = 2 \left[L' + \frac{\pi}{2} (D + 2h_{13} + 2.0 \text{ mm}) \right]. \quad (35)$$

Kun kuparin sähkönjohtavuudelle käytetään arvoa $\gamma = 1/1,72 \cdot 10^{-8} \text{ S/m}$, resistanssiksi tulee $R_t = 64,1 \text{ m}\Omega$. Tässä arvossa ei ole mukana virranahdon vaikutusta. Kuvassa 2.15 on esitetty tarvittava likimääräistys staattoriuran geometrialle.



Kuva 2.15. Virranahdon laskemiseksi todellinen staattorin uramuoto korvataan pinta-alaltaan yhtäsuurella suorakaiteella.

Kuvan 2.15 mitat ovat

$$A=2 \cdot 1,6 \text{ mm}=3,2 \text{ mm} \quad B=1,6 \text{ mm} \quad C=6,0 \text{ mm},$$

jolloin saadaan taajuudella

$$\begin{array}{llllll} f_1=2600 \text{ Hz:} & \xi=0,903, & k_{Ru}=4,51, & k_R=2,40 & \text{ja} & R_s=153,5 \text{ m}\Omega \\ f_2=2500 \text{ Hz:} & \xi=0,885, & k_{Ru}=4,25, & k_R=2,29 & \text{ja} & R_s=146,8 \text{ m}\Omega. \end{array}$$

Uran virranahdotkerroin on suuri, koska johtimen halkaisijana, B , on suoraan käytetty johtimen poikkipinnasta laskettua ympyrän halkaisijaa. Käytännössä johdin kannattaa jakaa osajohtimiin, jolloin k_{Ru} ja R_s pienenevät. Todellista suurempi virranahdo ei kuitenkaan vaikuta moottoreiden keskinäiseen vertailuun merkittävästi. Täten molempien moottorityyppien staattoriresistanssi on määritetty edellä esitetyllä tavalla, ja laskennassa on käytetty edellä saatua arvoa.

Perusaallon taajuudella $f=50 \text{ Hz}$ vyyhdenpääreaktanssi $X_{\sigma w} = 151,5 \text{ m}\Omega$. Taajuuden vaikutus otetaan huomioon käytettävissä ohjelmissa.

Staattorikäänin eristys

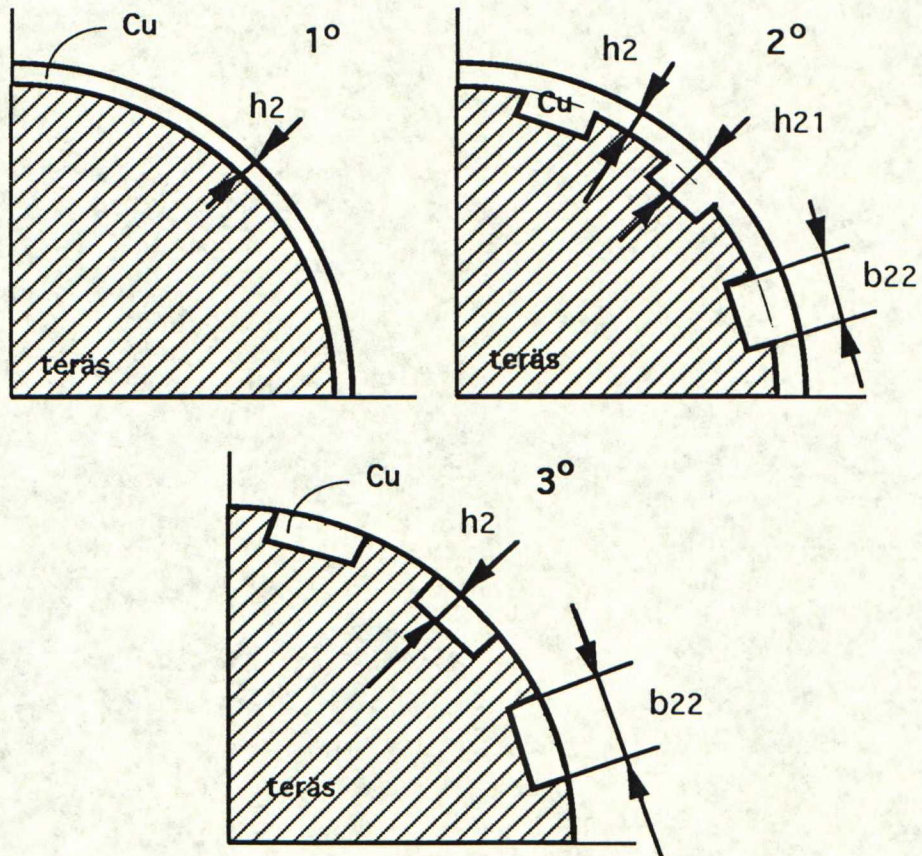
Moottorin sisältämä vesi asettaa suuria vaatimuksia staattorikäänin eristykselle. Vaihtoehtoina voidaan pitää holkitettua staattorirakennetta ja muovi- tai valuhartsieristystä. Staattorin sisään ilmaväliin voidaan asentaa ohut holkki ja päätytiloihin suunnitella labyrinthieristeet, jotka estävät vettä pääsemästä kosketuksiin käämityksen kanssa. Tällöin staattorin jäähtytys on toteutettava erillisenä esimerkiksi öljykierrätyksellä ja moottorin rakenne tulee huomattavasti monimutkaisemmaksi kuin vesijäähdytteisenä. Levypaketti, johon käämitys on asennettu valmiiksi, voidaan valaa hartsiin tyhjössä, jolloin eristystä heikentävät ilmakuplat poistuvat. Ratkaisun heikko kohta on lämpölaajeneminen, jonka ansiosta hartsikuori saattaa halkeilla ja eristys menetetään. Muovieristystä on vaikea valmistaa riittävän tiiviiksi.

Tämän työn yhteydessä suoritettavissa laskelmissa oletetaan, että staattorin sisällä on sisäpinnaltaan sileä holkki, jonka ansiosta kitkahäviöt pysyvät kohtuullisina, ja staattori on vesijäähdytetty, ts. sitä ei ole eristetty vesitilasta.

2.3.3 Oikosulkumoottori

Mitoitus etenee kaavion 1 mukaisesti. Staattorin mittoja lasketaan edellä esitetyllä tavalla käämin kierroslukua pienentämällä. Eri kierrosluvuilla saatavat mitat syötetään lähtötiedostoihin.

Tutkittavien roottorirakenteiden mittatiedot muodostuvat kuvassa 2.16 esitetyllä tavalla. Roottorielementeille tulee negatiivisia pinta-aloja, mikäli mitat valitaan liian suuriksi. Muutteleamalla roottorisauvojen kokoa ja pannan paksuutta päädytään kokeilun tuloksena taulukossa 2 esitettyihin arvoihin, jotka ovat ulkohalkaisijaltaan 11 mm roottorin suurimmat laskettavissa olevat mitat. Aluksi laskenta suoritetaan näillä mitoilla, mutta niitä voidaan myöhemmin pienentää, mikäli esimerkiksi roottorihäviöt sitä vaativat.



Kuva 2.16. Tutkittavien oikosulkuroottoreiden mitat.

Taulukko 2. Oikosulkuroottorivaihtoehtojen suurimmat laskettavissa olevat mitat.

roottori	h_2 [mm]	h_{21} [mm]	b_{22} [mm]
1°	1,0	-	-
2°	1,8	0,5	2,0
3°	1,8	-	2,0

Sinimuotoisuusoletukseen perustuvan ohjelman, CIMAC, laskeman vääntömomentin on todettu pitävän melko tarkasti yhtä mittausten kanssa. Ohjelmaa käytetään tarvittavan vääntömomentin antavan staattorikäänin kierrosluvun määrittämiseen. Tämä tapahtuu seuraavasti.

1. Kullakin roottorilla varustettu moottori lasketaan jättämällä $s=3,5\%$.
2. Jos ajon tuloksena saatava momentti on pienempi kuin $T_N=0,38\text{ Nm}$, valitaan uusi, pienempi kierrosluku, joka riippuu siitä, kuinka paljon momenttia on kasvatettava.
3. Lasketaan uutta kierroslukua vastaavan uran pinta-ala ja mitat muuttamatta johdinpinta-ala.
4. Lasketaan uuden käänin resistanssi ja vyyhdenpään reaktanssi.
5. Ajetaan MESH ja CIMAC.
6. Tarvittaessa jatketaan kohdasta 1.

Seuraavaksi lasketaan CIMAC:lla moottorin vääntömomentti eri jättämän arvoilla. Kierrosluvulle käytetään edellä saatavaa arvoa sekä tätä yhtä pienempää ja suurempaa kierroslukua. Tuloksena saadaan momenttikäyrä, josta voidaan määrittää kippimomentti. Staattorikäänin kierrosluvuksi valitaan se, jolla kippimomentti on noin kaksinkertainen nimellismomenttiin verrattuna.

2.3.4 Kestomagneettimoottori

Kestomagneettimoottori pyörii tahtinopeudella, mutta sen suunnittelu perinteisellä tahtikoneen suunnittelumenetelmällä ei ole mahdollista pienen koon vuoksi. Tahtikoneen suunnittelussa on usein lähtökohtana tehokerroin 1,0 tai jokin tätä lähellä oleva arvo. Edellytyksenä on, että roottorin magnetointi voidaan suunnitella riittävän suureksi joko kestomagneettimateriaalin määrää tai roottorivirtaa kasvattamalla. Magnetoinnin mitoituksella koneesta voidaan suunnitella yli- tai alimagnetoitu.

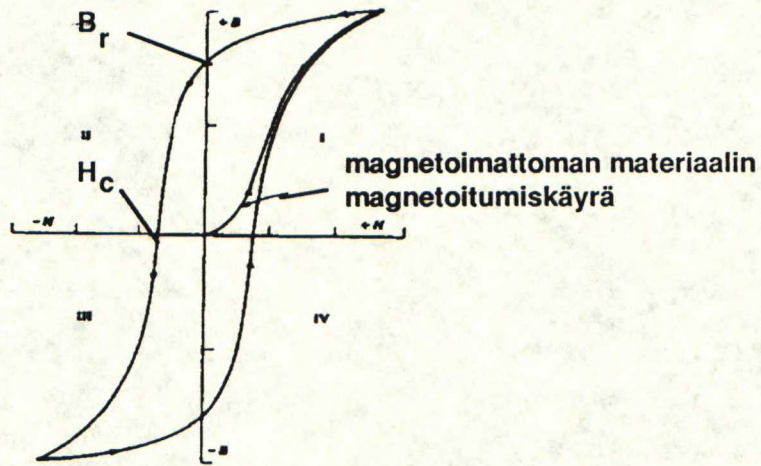
Työssä suunniteltavan moottorin roottorin ulkoiset mitat on määrätty, jolloin käytettävän kestomagneettimateriaalin määrä on rajoitettu ja pienen koon vuoksi melko pieni. Kestomagneetti tuottaa ainoastaan osan tarvittavasta magnetoinnista ja loppuosa on tuotettava staattorista ilmvälin kautta roottoriin. Tästä syystä tehokerroin määräytyy mm. kuormituksen mukaan ja moottori käy voimakkaasti induktiivisena. Mitä tehokkaampi kestomagneetti roottoriin saadaan mahtumaan, sitä suuremmaksi tehokerroin muodostuu ja sitä pienempi on staattorin loisvirta. Tällöin loisvirran aiheuttamat virtalämpöhäviöt pienenevät.

Kestomagneetin määrän kasvattamista rajoittaa sitä ympäröivän titaanipannan pienin sallittu paksuus.

Kestomagneettimateriaali

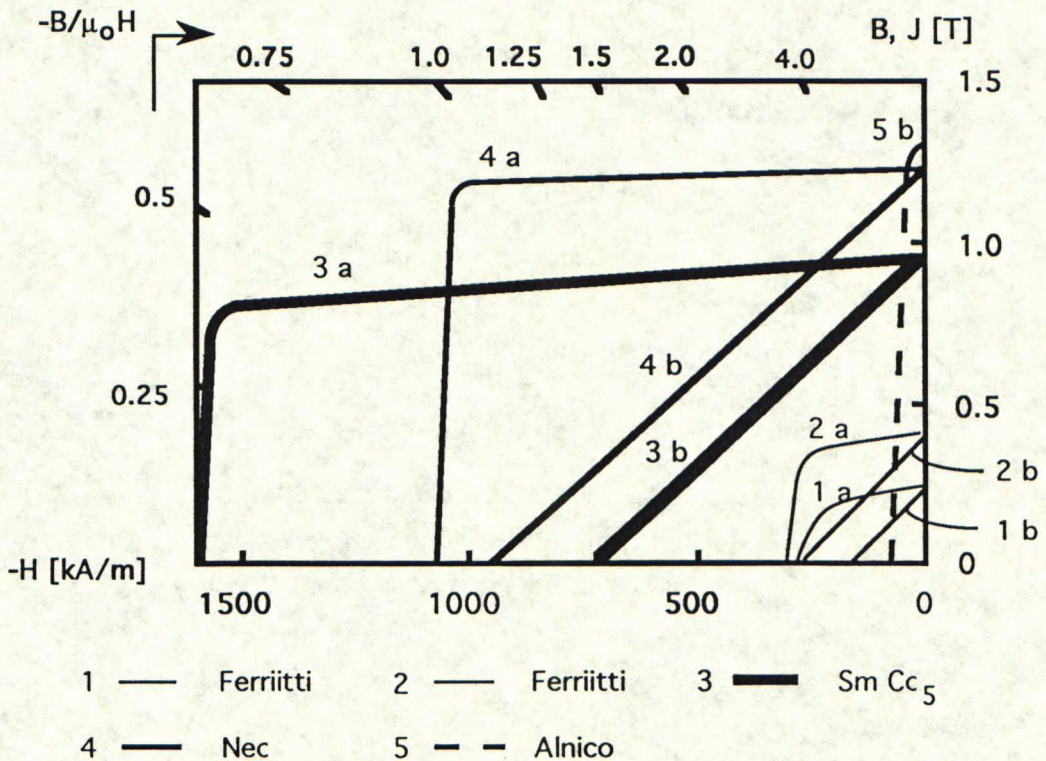
Kaupallisesti merkittäviä kestomagneettimateriaaleja ovat Alnico-, ferriitti-, RECO- ja NEO-magneetit sekä polymeerisidoksiset magneetit. Näistä ferriitit ovat ferrimagneettisia ja muut ferromagneettisia yhdisteitä. Kun tällainen materiaali on saturaatiomagnetoitu ja ulkoinen magneettikenttä poistetaan, magneettinen induktio ei alene magnetoitumiskäyrää pitkin vaan materiaaliin jää remanenssi (eli jäännösinduktio), B_r . Kun ulkoista magneettikenttää kasvatetaan vastakkaiseen suuntaan, ilmaraon induktio laskee vähitellen

ja tietyllä magneettikentän voimakkuudella menee nollaan. Tätä magneettikentän arvoa kutsutaan koersitiivivoimaksi, H_C . Kuva 2.17 havainnollistaa näitä käsitteitä.



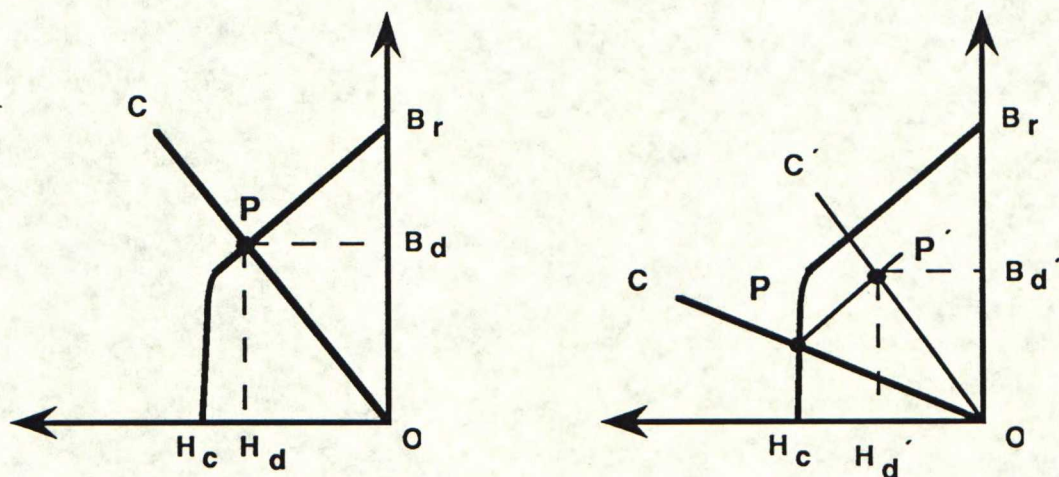
Kuva 2.17. Ferromagneettisen materiaalin hystereesisilmukka.

Kestomagneettien ominaisuuksista tärkeimpiä ovat remanenssivuontiheys ja koersitiivikentänvoimakkuus sekä maksimi energiatulo $(B_d H_d)_{\max}$. Energiatulo on sen työn mitta, jolla magneettia voidaan hyödyntää. Kuvassa 2.18 on esitetty eri materiaalien ominaiskäyriä toisessa neljänneksessä. Niiden avulla voidaan materiaaleja vertailla keskenään, mutta arvot ovat kaupallisesta esitteestä, joten ne saattavat joidenkin magneettien osalta olla todellista parempia. Niiden käyttämiseen laskelmissa on suhtauduttava varovaisesti.



Kuva 2.18. Eräiden kestmagneettimateriaalien magneettisia ominaisuuksia.
a: $J = f(H)$ ja b: $B = f(H)$.

Kestomagneetin kuormitus-suoran määräävät magneetin geometria ja magneettipiirin ominaisuudet. Magneettipiiri tulee suunnitella siten, että kuormitus-suoran ja demagnetointikäyrän leikkauspiste eli magneetin toimintapiste sijaitsee ominaiskäyrässä mahdollisesti ilmenevän polven yläpuolella. Mikäli toimintapiste valuu ulkoisen kentän vaikutuksesta polven alapuolelle, se ei enää palaa demagnetointisuoraa pitkin vaan remanenssi jää pysyvästi alhaisemmalle tasolle kuin alkuperäinen magnetointi edellyttäisi. Tällöin magneetin toimintakyky on pysyvästi heikentynyt. Tilannetta havainnollistaa kuva 2.19.



Kuva 2.19. Kestomagneetin demagnetointikäyrä, toimintapiste ja kuormitus-suora, jonka kulmakerroin $B_d/\mu_0 H_d$.

Alnico-magneetit ovat alumiinin, nikkelin ja koboltin sekä raudan seoksia, joissa on lisäksi pieniä määriä titaania ja kuparia. Ne valmistetaan valamalla tai sintraamalla ja ovat muiden kestopomagneettien lailla hauraita ja kovia. Korkeasta Curie-lämpötilasta, $T_{Cmax}=900^\circ C$, ja pienistä palautuvista muutoksista johtuen ne ovat hyvin käyttökelpoisia sovelluksissa, joissa esiintyy korkeita lämpötiloja. Alnico-magneettien koersitiivikentänvoimakkuus on hyvin pieni, mikä asettaa erityisiä vaatimuksia magneettipiirin suunnittelulle.

Nykyisin valmistettavat ferriitit ovat bariumin, raudan ja koboltin tai strontiumin, raudan ja hapen yhdisteitä. Myös lyijyferriittejä valmistetaan jonkin verran. Ferriiteillä on Alnicoihin verrattuna pieni remanenssi-voimallisuus mutta suuri koersitiivivoimakkuus. Alhaisen hintansa vuoksi ne ovat eniten käytettyjä kestopomagneetteja.

RECO-magneetit (Rare Earth Cobalt) ovat metallien välisiä yhdisteitä R_xM_y , joissa R on jokin harvinainen maametalli (Ce, Pr, Sm) ja M on jokin transitiometalli (Mn, Fe, Co). Parhaat ominaisuudet on SmCo₅-magneeteilla, jotka ovat magneettisilta ominaisuuksiltaan selvästi ferriittejä ja Alnico-magneetteja parempia. Ne ovat erittäin kovia ja hauraita ja siten hankalia työstää. SmCo-magneetit kestävät hyvin korkeita lämpötiloja ja niiden ominaisuudet riippuvat lämpötilasta vain vähän. Näiden haittana on korkea hinta.

NEO-magneetit koostuvat jostakin harvinaisesta maametallista (Ce, Pr, Nd) sekä raudasta ja boorista. Magneettisilta ominaisuuksiltaan NdFeB-magneetit ovat ylivoimaisia. Niiden suuri energiatiheys ja hinta ovat merkittävä etu SmCo-magneetteihin nähden. Lisäksi NdFeB-magneetteja on helpompi työstää. Kun pienestä tilavuudesta on saatava suuri magneettinen energia, NdFeB-magneetit ovat paras ratkaisu, mikäli korkeat lämpötilat voidaan sovelluksessa välttää, sillä NdFeB-magneetit ovat erittäin arkoja

lämpötilan muutoksille ja niitä ei juuri voida käyttää yli 150 °C lämpötiloissa ominaisuuksien kärsimättä. NEO-magneettien korroosiokestävyys on huono ja ne tuleekin pinnoittaa, mikäli käyttöolosuhteissa esiintyy kosteutta. Erityisesti tulee välttää altistumista vedylle, sillä NEO-magneetit rapautuvat vetyä sisältävässä kaasukehässä. Täten kestomagneettimoottorin jäähdytys on järjestettävä muulla tavoin kuin vetyjäähdytyksenä.

NEO-magneetit magnetoidaan ennen lopullista käyttökohteeseen asentamista. Magneettien toimintapiste on syytä tarkistaa, koska se saattaa asentamisen aikana muuttua. Lämpötilan nousu aiheuttaa kaikissa magneettimateriaaleissa palautuvia ja palautumattomia vuon muutoksia, jotka erityisesti NEO-magneetteja käytettäessä on otettava huomioon. Lämpötilan kasvaessa sekä remanenssi että koersitiivivoima pienenevät. Nämä muutokset palautuvat täysin lämpötilan laskiessa. Korkeammissa lämpötiloissa demagnetointisuoraan ilmestyy polvi. Palautumattomia muutoksia ilmenee silloin, kun toimintapiste valuu tämän kohdan alapuolelle. Muutokset voidaan korjata magnetoimalla magneetit uudelleen. Lämpötilan nousu ei aiheuta korjaamattomia muutoksia NEO-magneeteille.

Suunniteltavassa moottorissa on käytettävissä rajoitettu tilavuus magneettimateriaalia varten. Koska pienestä magneetista on saatava mahdollisimman suuri hyöty, lasketaan moottori NdFeB-magneetin ominaisuuksilla. Mikäli roottorin lämpötilaa ei tehokkaasta vesijäähdytyksestä huolimatta kyetä pitämään riittävän alhaisena, magneettimateriaaliksi on valittava SmCo₅.

Mitoitus

Lähtökohtana pidetään sitä staattorigeometriaa, jolla oikosulkukoneen yhteydessä tehdyt ajot antavat positiiviset elementtien pinta-alat. Muut arvot ovat kappaleessa 2.3.2 määritetyn mukaiset.

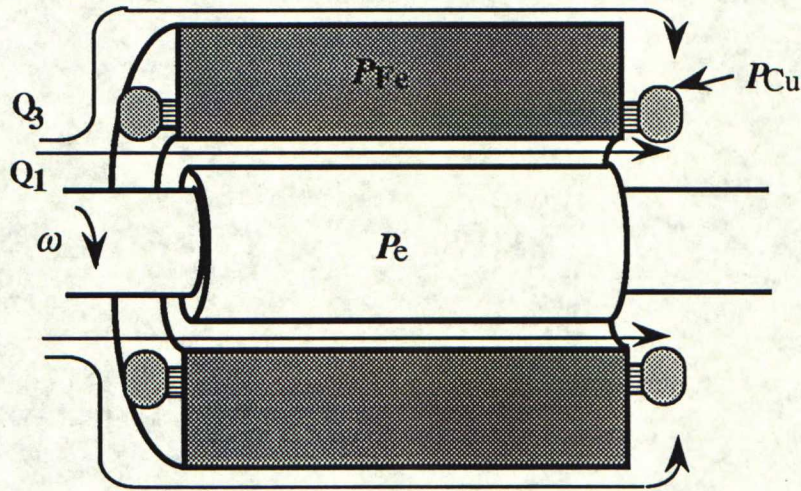
Kestomagneettimateriaalin määrää voidaan kasvattaa vain roottorin ympärillä olevaa titaaniipantaa ohentamalla. Valitaan lähtökohdaksi pannan paksuudelle 2,0 mm, jolla mekaanisen mitoituksen yhteydessä on laskettu ominaistajuuksia.

Lähtötiedosto on sama kuin oikosulkumoottorin laskennassa, mutta elementtiverkko muodostetaan ohjelmalla PMESH. Riittävää momenttia vastaava staattorin kierrosluku haetaan sinimuotoisuusoletukseen perustuvan ohjelman, PMAC, avulla käyttäen samaa menetelmää kuin oikosulkumoottorin yhteydessä. Roottorin asemakulmaksi valitaan -80, mikä on toteutettavissa roottorin asemakulman mukaan kommutoivalla taajuudenmuuttajalla ('harjaton tasasähkökone'). Kun tällä napakulmalla riittävän vääntömomentin antava kierrosluku on löytynyt, PMAC:lla lasketaan momentti eri napakulman arvoilla momenttikäyrän määrittämiseksi. Kierroslukuna käytetään edellä saatua sekä sitä lähellä olevia arvoja.

2.4 Lämpenemien laskenta ja lopullinen mitoitus

Lämpenemät lasketaan ohjelmalla, jossa staattori, ilmaväli ja päätytilat mallitetaan perinteisellä lämpöverkolla ja roottorissa ratkaistaan lämpötilan osittaisdifferentiaaliyhtälö elementtimenetelmällä (Väänänen 1992). Laskentamalli on staattinen eli lämpötilojen aikariippuvuutta ei malliteta vaan tuloksena saadaan jatkuvan tilan lämpenemät moottorin eri kohdissa. Ohjelmisto toimii toistaiseksi vain kestomagneettimoottorin laskennassa eikä sillä voida mitoittaa oikosulkumoottoria lämpenemien osalta. Staattoreiden samankaltaisuudesta johtuen tuloksia voidaan kuitenkin käyttää hyväksi oikosulkumoottorin jäähtymistä arvioitaessa.

Laskettavassa moottorissa kulkevat veden tilavuusvirrat määritellään kuvan 2.20 mukaisesti. Laakerien hankaushäviöt lasketaan erillisellä tietokoneohjelmalla ja annetaan lämpenemisen laskentaohjelmalle valmiina syöttötietona. Ilmavälin hankaushäviöt määritetään kohdassa 2.2.1 esitetyllä tavalla ja annetaan myös valmiina syöttötietona. Sähköiset häviöt saadaan suoraan aika-alueanalyysin tuloksena.



Kuva 2.20. Veden virtaus, Q_1 ja Q_3 , lämpenemisen laskentaohjelmassa.

Lämmönsiirtokertoimet

Suurin epävarmuustekijä lämpenemisen laskennassa on lämmön siirtymisen kuvaaminen materiaalien rajapinnoissa. Tähän pyritään lämmönsiirtokertoimien avulla. Lämmön siirtyminen valiaineeseen on karheasta pinnasta tehokkaampaa kuin sileästä. Pinnankarheuden vaikutus lämmönsiirtokertoimiin on hankalasti laskettavissa, ja kohtalaisenkin tarkkuuden saavuttamiseksi se on määritettävä kussakin tapauksessa erikseen mittaamalla. Koska ilmavälissä on vettä, roottorin ja staattorin pintojen on kitkahäviöiden vuoksi oltava sileät. Tästä syystä seuraavassa tarkastellaan vain sileiden pintojen lämmönsiirtoa.

Lämmönsiirtokertoimien määrittämisessä käytetään apuna useita yksiköttömiä kertoimia. Virtauksen nopeuden ja aineen virtausominaisuuksia kuvataan Reynoldsin luvulla, joka lasketaan kaavasta

$$Re = \frac{\rho d_h}{\mu} v_{red}. \quad (36)$$

Tässä v_{red} on virtauksen redusoitu nopeus, joka ottaa huomioon sekä aksiaalisen että tangentialisen nopeuden

$$v_{red} = \sqrt{\left(\frac{\omega R}{2}\right)^2 + v_{aks}^2}. \quad (37)$$

Prandtlin luku kuvaa kinemaattisen viskositeetin ja termisen diffuusion suhdetta

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \quad (38)$$

missä c_p on ominaislämpökapasiteetti ja λ on lämmönjohtavuus. Grasshofin luku ottaa huomioon jäähdytettävän pinnan läheisyydessä lämpötilan noususta aiheutuvan virtausaineen tiheyden muutoksen, mikä gravitaation vaikutuksesta antaa virtausaineelle paikallista kiihtyvyyttä.

$$Gr = L^3 g \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^2 \frac{\Delta T}{T}, \quad (39)$$

missä $g=9.81\text{m/s}^2$, ΔT on virtausaineen ja jäähdytettävän pinnan lämpötilojen ero ja T on virtausaineen alkulämpötila.

Lämmönsiirtokerroin, α , voidaan laskea kaavasta

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_h} Nu, \quad (40)$$

jossa Nu on Nusseldtin luku ja d_h on väliaineen virtausraon hydraulinen halkaisija.

Nusseldtin luku voidaan Polkowskin mukaan määrittää Reynoldsin analogiaa käyttäen. Tämän edellytyksenä on kuitenkin, että raossa virtaavan kaasun lämpötila akselin suunnassa pysyy vakiona ja että Prandtlin luku on noin yksi. Sähkökoneen ilmapölyssä virtaava jäähdytysaine lämpenee edetessään ja vain pieni osa roottorin lämpötehosta siirtyy staattoriin. Ilmapölyssä ja veden ulostulon puoleisessa vyyhdenpäätilassa esiintyy sekä aksiaalista että tangentialista virtausta, joka on turbulentti. Reynoldsin analogia ei päde nesteille, koska niillä $Pr > 1$.

Näistä syistä ilmapölyn lämmönsiirtokerrointa laskettaessa on käytettävä normaalia putkivirtausyhtälöä

$$Nu = 0.0214(Re^{0.8} - 100)Pr^{0.4}. \quad (41)$$

Ilmavälin hydraulinen halkaisija $d_h=2\delta$, missä δ on moottorin ilmaväli. Ilmavälin kautta kulkeva vesi saa roottorin pyörimisestä johtuen suuren tangentialisen nopeuden ja redusoitu nopeus lasketaan suoraan kaavasta (37). Nusseldtin luku lasketaan kaavasta (41).

Staattoriselän ja moottorin kuoren välissä virtaus on laminaari, jolloin Nusseldtin luku lasketaan seuraavasti (Jokilaakso 1987)

$$Nu = 1.02 Re^{0.45} Pr^{0.5} Gr^{0.05} \left(\frac{d_h}{L'} \right)^{0.4} \left(\frac{D_{kuori}}{D_s} \right)^{0.8} \left(\frac{\mu_b}{\mu_1} \right)^{0.14} \quad (42)$$

Staattorin selässä kulkee vain akselin suuntainen virtaus (kuva 2.16), jolloin redusoitu nopeus korvataan aksiaalisella nopeudella

$$v_{red} = v_{aks} = \frac{q_v}{A}, \quad (43)$$

missä A on staattorin selän ja koneen ulkokuoren väliin jäävän virtaustilan poikkipinta ja q_v on veden tilavuusvirta. Hydraulinen halkaisija on nyt kaksi kertaa selän ja kuoren välinen etäisyys. Nusseldtin luku lasketaan kaavasta (42).

Virtauksen arvioiminen vyyhdenpäättilassa on ongelmallista sen monimutkaisen geometrian vuoksi. Vyyhdenpäättila ei ole putkimainen vaan ohikulkeva virtaus huuhtelee suuremmassa tilassa olevaa käämiä. Geometrian monimutkaisuudesta johtuen lämmönsiirtokertoimien tarkka laskeminen on erittäin hankalaa ja varmintä onkin tehdä likimääräistys, joka todennäköisesti antaa todellista pienemmän lämmönsiirtokertoimen. Siten todellinen moottori jäähtyy laskettua paremmin. Jotta laskentaa varten saadaan edes jonkinlaisia arvoja, käytetään tässä vyyhdenpäälle samaa lämmönsiirtokerrointa kuin staattoriselälle.

Edellä esitetyllä laskentatavalla saadaan nesteille, tässä tapauksessa vedelle, hyvin suuria, jopa tuhatkertaisia lämmönsiirtokertoimen arvoja kaasuihin verrattuna. Taulukkoon 3 on laskettu kertoimia eri lämpötiloissa vedelle ja vertailun vuoksi ilmalle. Veden ja ilman ominaisuudet eri lämpötiloissa ovat lähteestä (Kays 1980). Ilmavälin suuret lämmönsiirtokertoimet johtuvat suuresta tangentialisesta virtausnopeudesta, jonka roottorin pyöriminen saa aikaan. Sen sijaan staattoriselässä virtaus on laminaarinen ja virtausnopeus hyvin pieni johtuen pienestä kokonaisvirtaamasta. Siksi myös lämmönsiirtokertoimet ovat pieniä.

Taulukko 3. Lämmönsiirtokertoimia, kun jäähdytysaineena on vesi tai ilma.

Lämmönsiirtokertoimia vedelle				
	ilmaväli	selkä	pääty 1	pääty 2
t [°C]	α_1 [W/m ² K]	α_2 [W/m ² K]	α_3 [W/m ² K]	α_4 [W/m ² K]
40	160120	2462	2462	2462
80	209150	2590	2590	2590
100	229300	2625	2625	2625
Lämmönsiirtokertoimia ilmalle				
	ilmaväli	selkä	pääty 1	pääty 2
t [°C]	α_1 [W/m ² K]	α_2 [W/m ² K]	α_3 [W/m ² K]	α_4 [W/m ² K]
100	490	8	8	8

Lopullinen mitoitus

Mitoitus suoritetaan loppuun kaaviota 1 noudattaen. Sähkömagneettisten häviöiden määrittämiseksi suoritetaan aika-askelanalyysi niille moottorikonstruktioiden, joille sinimuotoisuusanalyysin perusteella saadaan parhaat ominaisuudet.

Lämpenemät lasketaan ohjelmalla TERMO. Tulosten avulla tarkastellaan lämpenemiä moottorin eri kohdissa ja muutetaan virtausmääriä tarpeen mukaan siten, että ylikuumenemista ei esiinny. Mikäli lämpenemiin jää varaa materiaalien ominaisuudet huomioon ottaen, mitoitus on väljä eli moottorin tilavuus on suurempi kuin siitä saatava teho edellyttäisi. Tällöin palataan kaavion 1 alkuun ja tehdään uusi mitoitus edellistä tiukemmilla arvoilla.

2.5 Laskennassa käytettävät materiaalitiedot

Staattorilevynä käytettävän Bochum HF 20 ominaisuudet on esitetty liitteen 1 taulukossa 1. Häviöluvut on mitattu TKK:n sähkömekaniikan laboratoriossa.

Roottorimateriaalien ominaisuudet on esitetty liitteen 1 taulukossa 2.

Kestomagneettia ympäröivän pannan materiaali on monista titaaniseoksista kaupallisesti eniten käytetty Gr5 titaani (Ti-6Al-4V). Koska Gr5:n sähkönjohtavuus pienenee jonkin verran lämpötilan kasvaessa, huoneenlämpötilaa $t=21,1^{\circ}\text{C}$ vastaavaa arvoa voidaan turvallisesti käyttää laskuissa, sillä roottoria lämmittävät häviöt pienenevät johtavuuden pienentyessä.

Kestomagneetti NdFeB kuvataan demagnetointisuorana, jonka remanenssi-vuontiheys on $B_r=1,08\text{ T}$ ja koersitiivikentänvoimakkuus $H_c=-860\text{ kA/m}$ (Outokumpu Magnets Oy 1990). Lämmönjohtavuus on laskettu verrannolla titaenin lämmönjohtavuutta hyväksi käyttäen.

Laskennassa käytettäviä staattorikäämin ominaisuuksia on taulukossa 4. Siitä puuttuu joitakin staattorikäämiä kuvaavia suureita kuten johdinkierrosluku, resistanssi ja vyyhdenpään hajareaktanssi, jotka ovat mitoituksen kuluessa muuttuvia suureita. Ne esitetään myöhemmin tulosten yhteydessä.

Taulukko 4. Staattorikäämityksen ominaisuuksia

Vaiheluku	3
Uraluku	12
Rinnakkaisten haarojen lukumäärä	1
Napaluku	2
Käämilangan materiaali ja halkaisija	Cu 0,3 mm
Täytekerroin	0,35
Uraeristeen paksuus	0,3 mm
Käämilangan lämmönjohtavuus	394 W/mK
Uraeristeen lämmönjohtavuus	0,18 W/mK
Lämmönsiirtokerroin johdinalueesta uraeristeeseen	5000 W/m ² K
Lämmönsiirtokerroin uraeristeestä levypakettiin	450 W/m ² K
Lämmönsiirtokerroin uraeristeestä ilmapäliin	taulukosta 3

3 MITOITUKSEN TULOKSET

Valitulle staattorigeometrialle laskettiin aluksi erilaisia käämin kierroslukuja vastaavat mitat sekä käämin virranahtokertoimet ja yhden vaiheen resistanssi ja vyyhdenpään reaktanssi. Apuna käytettiin MATLAB-ohjelmaa .

Laskennassa käytettiin syöttöjännitteen tehollisarvona (pääjännite) oikosulkumoottorille $U_s=380,0$ V, jonka muodostaminen taajuudenmuuttajalla on yksinkertaista. Kestomagneettimoottorille käytettiin $U_s=350,0$ V, koska sitä käytännössä ohjataan harjattoman tasasähkökoneen tavoin eli taajuudenmuuttajan kommutointi tapahtuu roottorin asemakulman mukaan. Tieto roottorin asennosta saadaan ilmaväliin asennettavilta antureilta, jotka reagoivat roottorin magneettikentänvoimakkuuden muutoksiin. Staattorikäämitys oli tähtikytkennässä, koska syöttölähteenä on käytettävä taajuudenmuuttajaa.

Laskettujen moottoreiden tehollinen pituus $L'=60,0$ mm ja staattorin sisähalkaisija $D=13,0$ mm sekä ilmaväli $\delta=1,0$ mm. Ilmavälin suuri arvo johtuu siitä, että staattorin sisälle asennettaneen sisäpinnaltaan sileä holkki vesikitkahäviöiden pienentämiseksi. Holkin tulee olla sähköisesti johtamaton, jotta siihen ei indusoituisi kohtuuttomia pyörevirtoja, ja magneettisesti johtamaton, jotta staattorin magneettivuoto pääsee ilmavälin kautta roottoriin. Se kuvataan käytetyissä ohjelmistoissa ilmana.

Taulukko 5. Sähkömagneettisen mitoituksen tuloksena syntyneet moottoreiden mitat.

	Oikos. moottori	Kestom. moottori
Staattorikäämin kierrosluku	12	15
Staattorikäämin resistanssi	74,7 mΩ	102,5 mΩ
Levypaketin pituus	60,0 mm	60,0 mm
Staattorin ulkohalkaisija	67,4 mm	72,4 mm
Ilmavälihalkaisija	13,0 mm	13,0 mm
Uran poikkipinta-ala	100,1 mm ²	125,1 mm ²
Uran korkeus	21,2 mm	23,7 mm
Uran leveys (max)	7,5 mm	8,5 mm
Roottorin halkaisija	11,0 mm	11,0 mm
Sauvojen lukumäärä	10	
Sauvan poikkipinta	2,7 mm ²	

3.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorilla nimellismomentti ei saisi olla yli puolta kippimomentista. Eri staattorikäämin kierroslukuja vastaavilla staattorigeometrioilla laskettiin kaikki kolme roottorivaihtoehtoa sinimuotoista jännitettä käyttämällä. Kullekin roottorille haettiin se kierrosluku, jolla

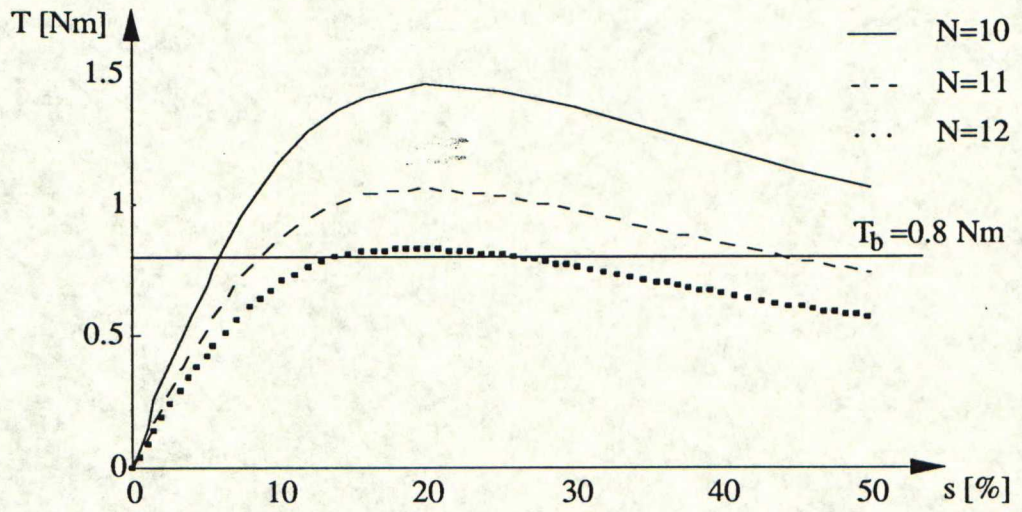
$$T_b \approx 2T_N, \quad (44)$$

missä T_b on kippimomentti. Laskennan tuloksista on piirretty momenttikäyrät kolmella eri kierrosluvulla kuvaan 3.1. Kaikilla roottoreilla $N_c=12$ täyttää tämän ehdon ja pienemmillä kierrosluvuilla kippimomentti ylittää vaatimukset selvästi. Suuremmilla kierrosluvuilla momentti yltää melko lähelle arvoa $T_b=0,8$ Nm jääden kuitenkin sen alle, joten yksityiskohtaisempi tarkastelu tehtiin kierrosluvulla $N_c=12$. Kuvissa 3.2-4 on tällä arvolla kullakin roottorilla laskettuja tuloksia.

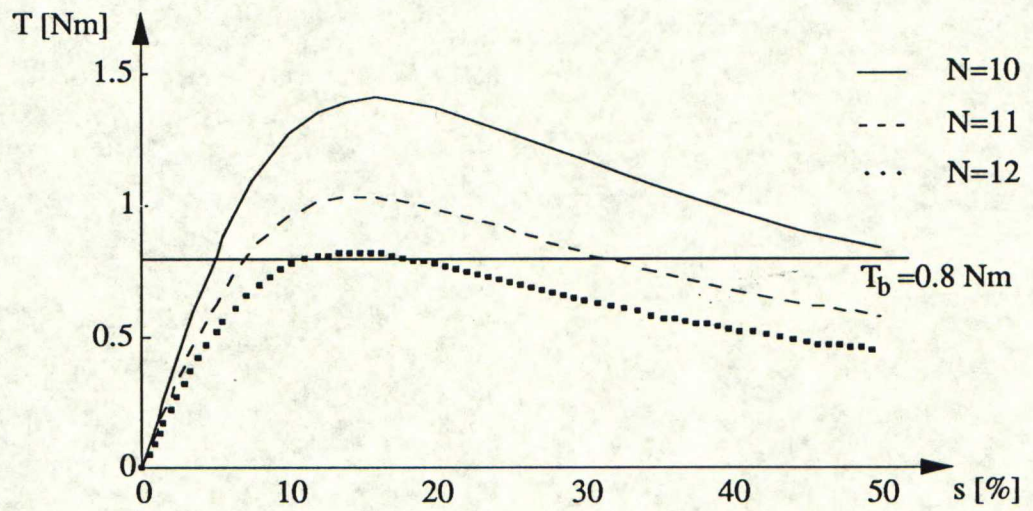
Roottori 1 tarvitsee suuremman jättämän synnyttääkseen yhtä suuren vääntömomentin kuin toiset roottorit (kuva 3.2). Sen kippijättämä on noin 6 % suurempi kuin kahdella muulla roottorilla. Tämä johtaa suurempiin roottorihäviöihin, jotka huonontavat hyötysuhdetta ja kuumentavat roottoria. Roottoreiden 2 ja 3 momenttikäyrät eivät poikkea merkittävästi toisistaan, joten näiden roottoreiden keskinäisen paremmuuden selvittämiseksi on tarkasteltava muita suureita.

Pienillä jättämän arvoilla, joilla moottori normaalisti toimii, roottori 3 vaatii pienimmän staattorivirran (kuva 3.3). Jättämällä $s=3,5$ % staattorivirran suhteellinen ero roottoreilla 2 ja 3 laskettujen moottoreiden välillä on yli 10 % (kuva 3.4). Tämä johtuu roottorin 2 pinnalla olevasta yhtenäisestä kuparipannasta, johon muodostuu pyörrevirtoja. Laskettu virta on roottorilla 1 pienin, kun jättämä lähestyy kippijättämää, mutta tällä ei ole normaalissa käyttötilanteessa merkitystä.

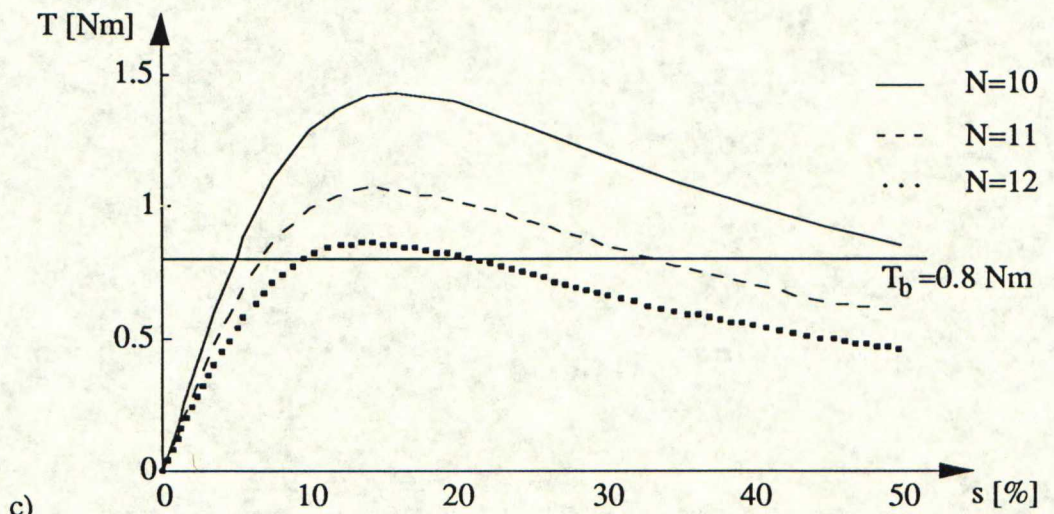
Moottorin tehokerroin on paras roottorilla 3 (kuva 3.6). Tosin ero ei pienillä jättämillä ole kovin suuri, mutta sen vaikutus yhdessä staattorivirran itseisarvossa esiintyvän eron kanssa on merkittävä. Roottorin 3 magnetoimiseen riittää siis pienempi loisvirta verrattuna muihin roottorivaihtoehtoihin. Tällöin staattorijohtimet eivät lämpene loisvirran vaikutuksesta. Sinimuotoisuusanalyysin perusteella roottori 3 on paras tutkituista geometrioista.



a)

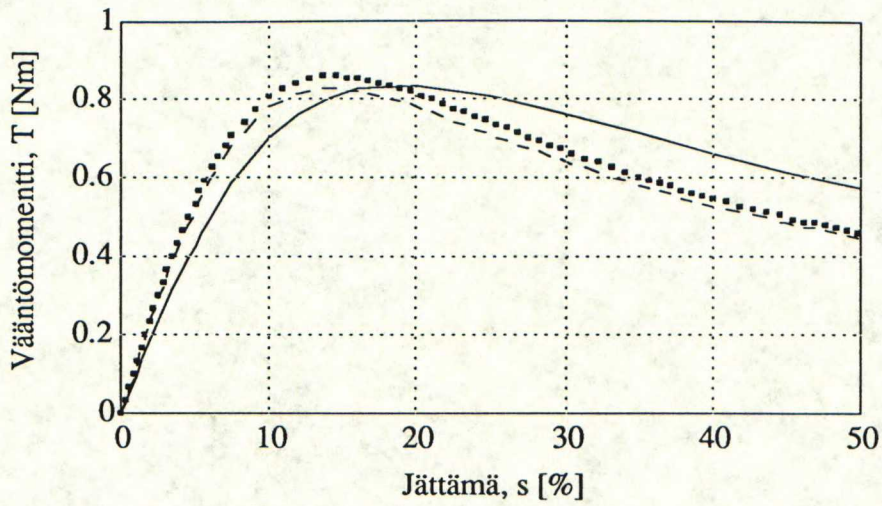


b)

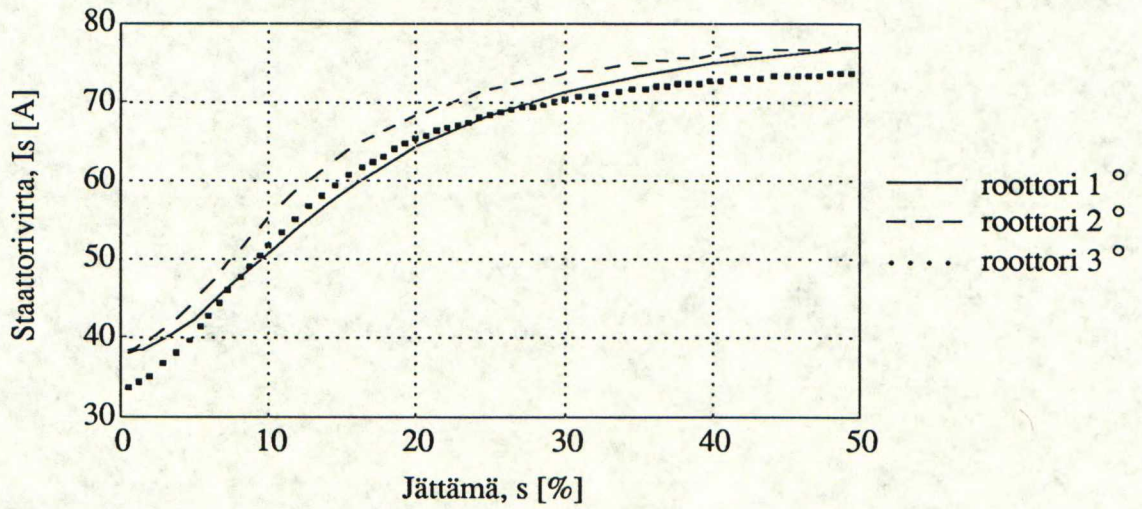


c)

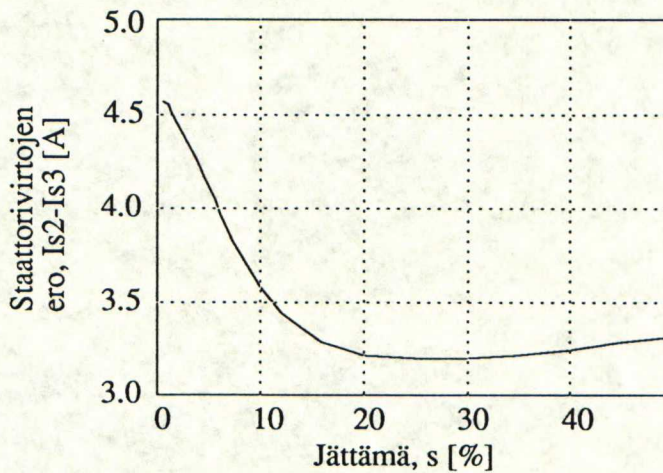
Kuva 3.1. Tutkittujen roottoreiden vääntömomenttikäyrät erilaisilla staattori-
käämin kierrosluvuilla: a) roottori 1, b) roottori 2 ja c) roottori 3.



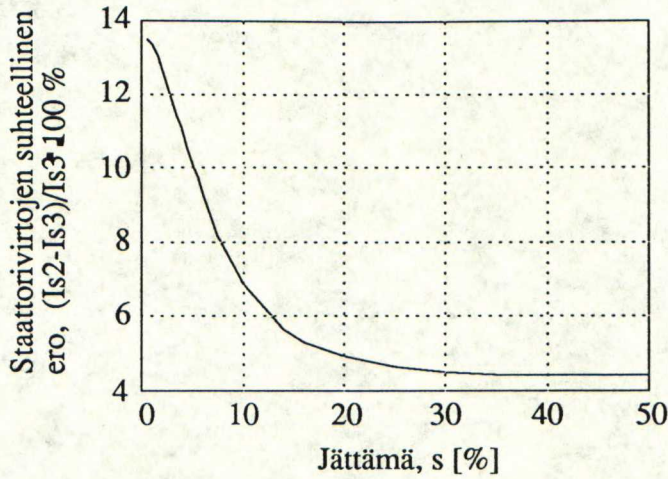
Kuva 3.2. Tutkittujen moottoreiden vääntömomentti jättämän funktiona sinimuotoisella syöttöjännitteellä. Staattorikäänin kierrosluku $N_c=12$.



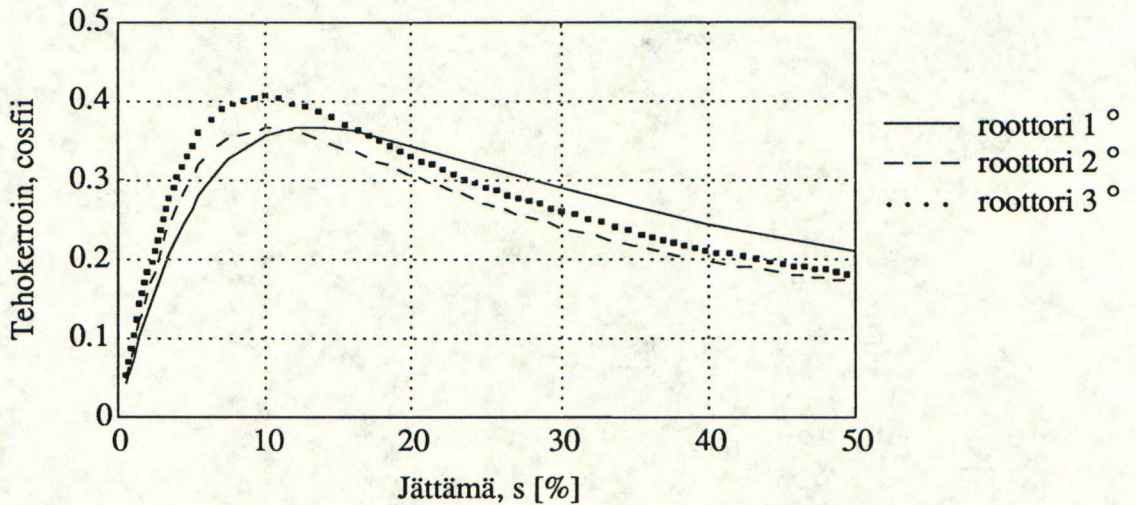
Kuva 3.3. Tutkittujen moottoreiden staattorivirta jättämän funktiona sinimuotoisella syöttöjännitteellä.



Kuva 3.4. Roottoreilla 2 ja 3 laskettujen moottoreiden staattorivirtojen absoluuttinen ero sinimuotoisella syöttöjännitteellä. $N_c=12$.



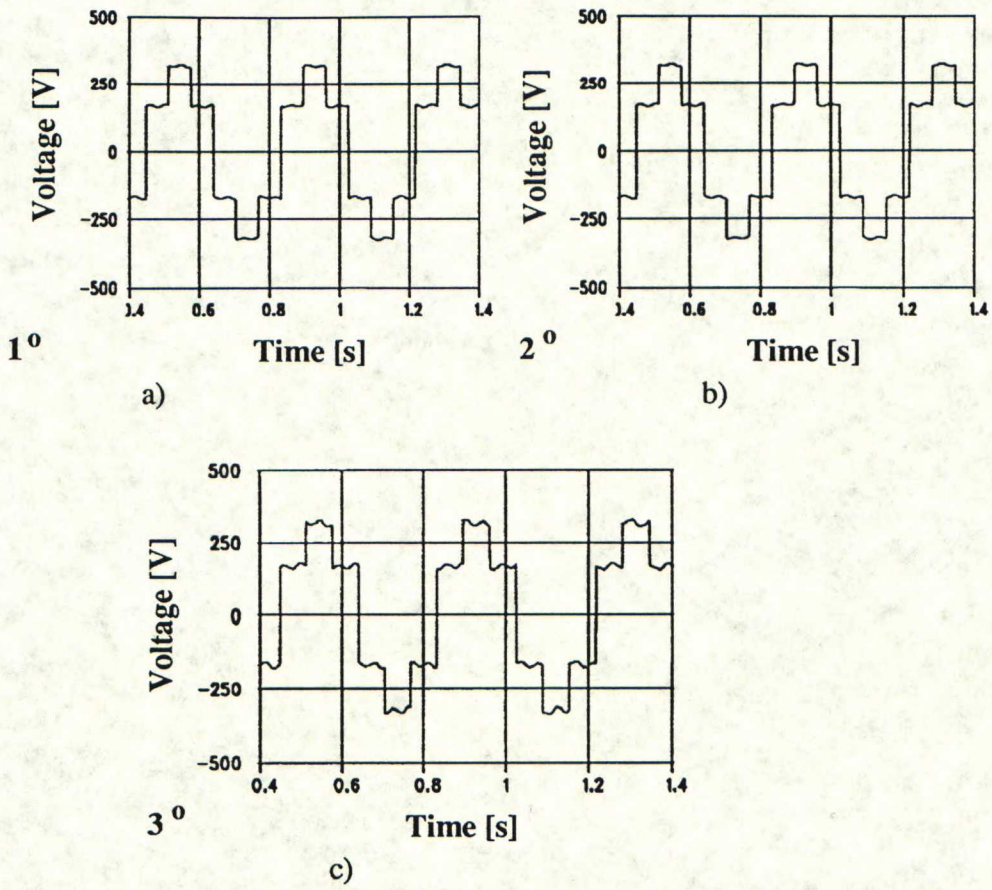
Kuva 3.5 Roottoreilla 2 ja 3 laskettujen moottoreiden staattorivirtojen suhteellinen ero sinimuotoisella syöttöjännitteellä. $N_c=12$.



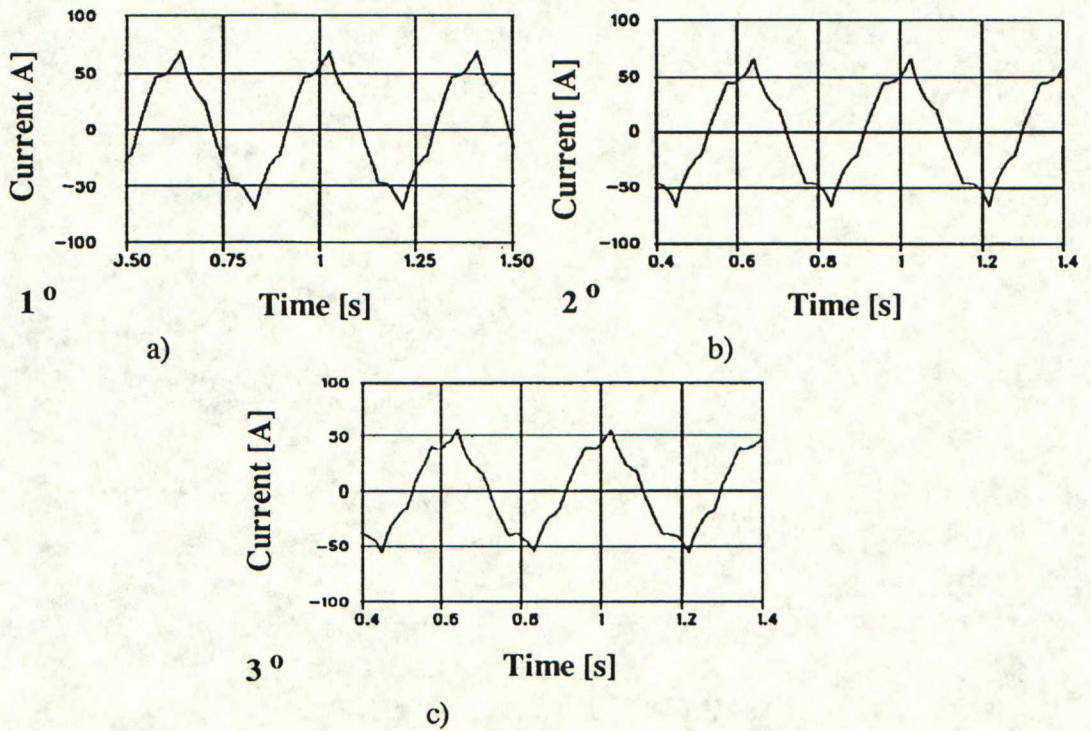
Kuva 3.6. Tukittujen moottoreiden tehokerroin jättämän funktiona sinimuotoisella syöttöjännitteellä. $N_c=12$.

Oletus sinimuotoisesta jännitteestä ei vaikuta merkittävästi vääntömomentin laskennassa saataviin tuloksiin. Sen sijaan häviöiden laskeminen tarkasti on mahdollista vain askelmenetelmää hyödyntävällä ohjelmalla. Tästä syystä staattorivirran ja tehokertoimen käyrät ovat melko kaukana todellisista, mutta yksinkertaistus on sama kullekin roottorivaihtoehdolle tehdyissä laskelmissa, joten siitä aiheutuva virhe vaikuttaa samaan suuntaan. Siksi esitettyjä käyriä voidaan käyttää eri vaihtoehtojen keskinäisten erojen tarkastelemiseen.

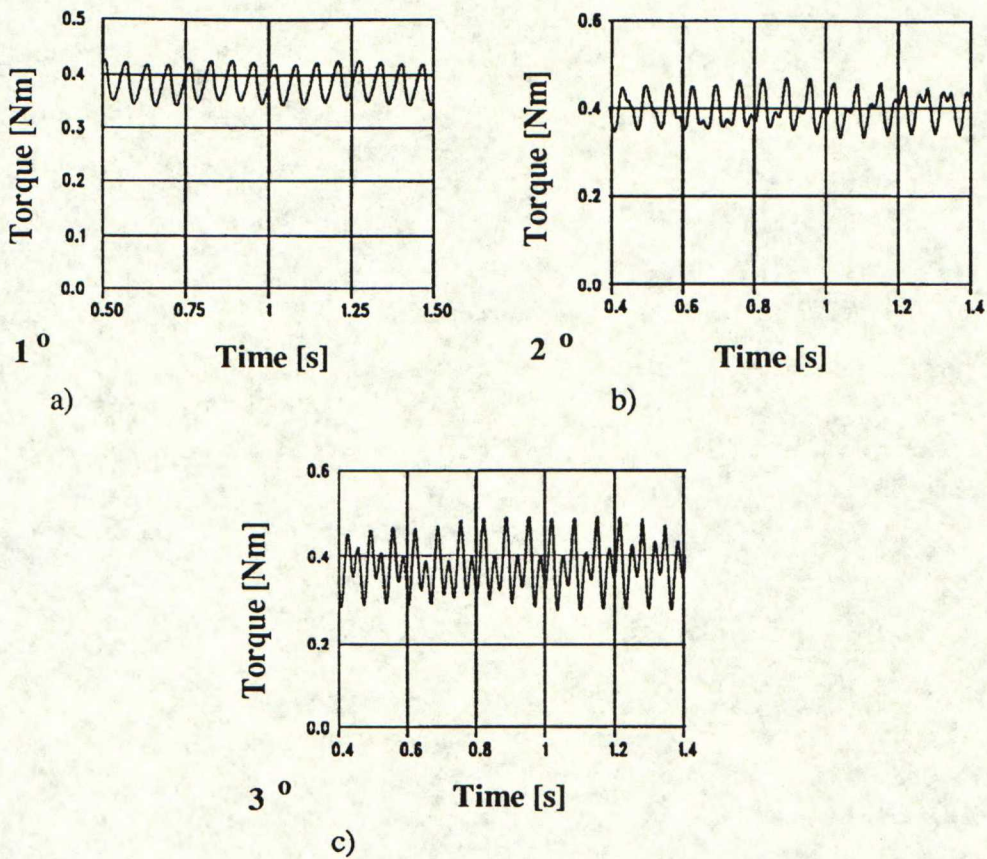
Aika-askelanalyysissä syöttöjännitteen muoto oli kuvan 3.7 mukainen. Roottorin sauvarakenteen vaikutus ilmenee jännitteen tasaisella osuudella (kuvat 3.7 b ja c). Sauvarakenne vaikuttaa myös staattorin vaihevirran muotoon (kuva 3.8), vaikka erot eivät ole eri roottorivaihtoehdoilla yhtä selvät kuin jännitteessä.



Kuva 3.7. Oikosulkumoottoreiden syöttöjännitteet askelmenetelmällä roottoreilla a) 1, b) 2 ja c) 3.



Kuva 3.8. Oikosulkumoottorin staattorivirta pulssimuotoisella syöttöjännitteellä.
a) Roottorin 1 jättämä $s=4,5\%$, b) roottorin 2 jättämä $s=3,6\%$ ja
c) roottorin 3 jättämä $s=3,5\%$.



Kuva 3.9. Oikosulkumoottorin vääntömomentti pulssimuotoisella syöttöjännitteellä. a) Roottorin 1 jättämä $s=4,5\%$, b) roottorin 2 jättämä $s=3,7\%$ ja c) roottorin 3 jättämä $s=3,5\%$.

Roottoreiden 2 ja 3 momentissa esiintyy epäsäännöllisyyttä, joka johtuu roottorisauvojen ja yliaaltojen aiheuttamista tahtimomenteista (kuva 3.9). Roottorin 1 momentti on säännöllisempi, koska sen pinnalla on vain sileä johdinpanta eikä sauvarakennetta.

Taulukko 6. Aika-askelanalyysin tuloksena saatuja oikosulkumoottorin ominaisuuksia eri roottorigeometrioilla.

		Roottori 1		Roottori 2		Roottori 3	
U_s	[V]	380,0		380,0		380,0	
s	[%]	4,2	4,5	3,5	3,6	3,3	3,5
T	[Nm]	0,359	0,383	0,37	0,378	0,359	0,379
I_s	[A]	41,6	42,1	38,9	39,0	33,1	34,0
J_s	[A/mm ²]	5	5,05	4,66	4,68	3,97	4,01
$\cos \varphi$		0,225	0,236	0,245	0,25	0,274	0,286
Häviöt							
P_s	[W]	626	635	576	577	483	487
P_r	[W]	430	467	398	410	309	333
P_{tot}	[W]	1056	1102	973	987	792	820

Taulukon 6 mukaan roottori 3 tuottaa saman vääntömomentin pienemmällä jättämällä kuin muut vaihtoehdot, mikä johtaa pienempiin roottorihäviöihin. Samoin nähdään, että tehokerroin on tällä geometrialla selvästi suurin, mikä vahvistaa sinimuotoisella jännitteellä saatua tulosta. Muita tutkittuja rakenteita pienempi staattorivirta johtuu siitä, että moottoria magnetoiva loisvirta on tällä roottorirakenteella pienempi. Myös lasketut sähkömagneettiset kokonaishäviöt ovat roottorilla 3 pienimmät.

Roottorilla 3 lasketun oikosulkumoottorin häviöt jakautuvat nimellispisteessä seuraavasti:

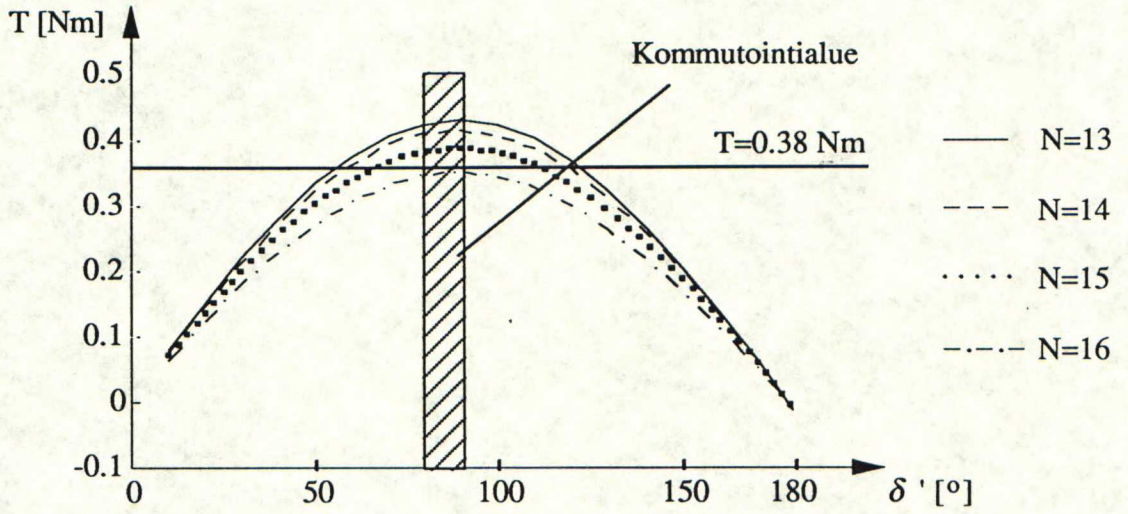
$$P_{Fe,s}=236,7 \text{ W}, P_{Cu,s}=249,9 \text{ W ja } P_{h,r}=333,0 \text{ W}.$$

Resistiiviset häviöt ovat samaa suuruusluokkaa kuin rautahäviöt, vaikka virrantiheys staattorijohtimissa on alhainen. Virrantiheyttä voidaan kasvattaa johtimen poikkipintaa pienentämällä, jolloin moottorin koko ja tarvittavan johdinmateriaalin määrä pienenee. Näin päästään kevyempään rakenteeseen ja alhaisempaan hintaan. Samalla kuitenkin häviöt kasvavat ja hyötysuhde huononee. Kasvaneet häviöt lämmittävät moottoria voimakkaammin, mutta vesijäähdytyksen ansiosta lämpenemät pysyvät kohtuullisina.

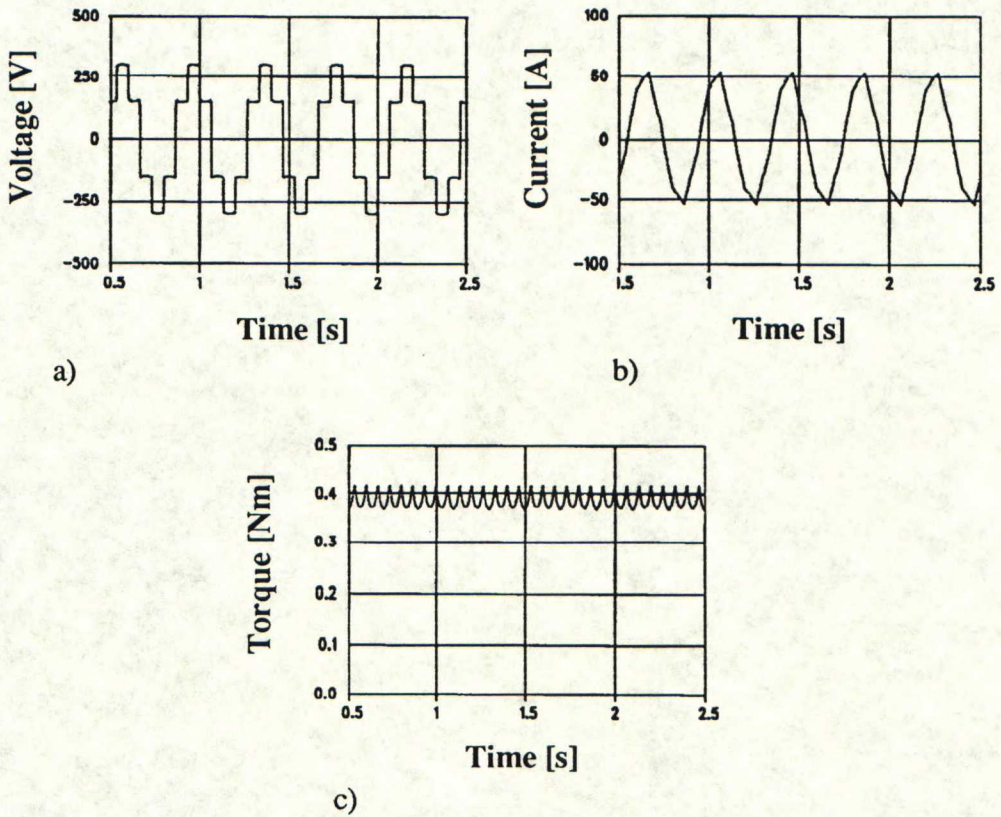
3.2 Kestomagneettimoottori

Kestomagneettimoottorin laskelmissa käytettiin staattorin mittoja, jotka saatiin oikosulkumoottorin mitoituksen yhteydessä eri staattorikäämin kierrosluvuilla. Moottoria syöttävän taajuudenmuuttajan ohjaus roottorin asennon mukaan tekee mahdolliseksi sen, että napapakulman vaihtelurajat voidaan valita vapaasti. Napakulma-alue, jolla moottori tällä tavoin ohjattuna toimii, kannattaa siten valita lähelle huippumomenttia vastaavaa arvoa, jolloin moottori tuottaa suurimman tehon tilavuutta kohti. Huippumomentin ylitystä ei esiinny, koska napapakulman lähestyessä huippumomenttia vastaavaa arvoa staattorin magneettikentän suunta muutetaan, jolloin napakulma pienenee muutosta vastaavan määrän. Vaikka käytännön toteutuksessa staattorin magneettikenttä muodostetaan tasajännitteellä, laskelmissa on käytettävä erilaisia vaihtojännitteen muotoja laskentaohjelmiston rakenteesta johtuen. Voiman ja siten vääntömomentin muodostumisen periaate on kuitenkin sama kummassakin tapauksessa ja niiden suuruus riippuu napapakulman arvosta. Täten ero laskennan lähtökohdan ja käytännön toteutuksen välillä ei heikennä laskentatulosten käyttökelpoisuutta kovin merkittävästi, mikäli laskennan yhteydessä napapakulman arvo valitaan edellä kuvatulla tavalla.

Kommutointialueella saavutetaan nimellismomentin suuruisen vääntömomentti staattorikäämin kierrosluvulla $N_c=15$ (kuva 3.10). Tämä sinimuotoisella jännitteellä saatu vääntömomentti on hyvin lähellä askelmenetelmällä saatua tulosta (kuva 3.9.c), kun kierroslukuna käytettiin $N_c=15$. Momentissa esiintyvä vaihtelu johtuu yliaaltojen synnyttämisestä epätahtimomenteista.



Kuva 3.10. Kestomagneettimoottorin vääntömomentti napakulman funktiona eri staattorikäämin kierrosluvuilla sinimuotoisella syöttöjännitteellä.



Kuva 3.11. Kestomagneettimoottorin a) syöttöjännite, b) staattorin yhden vaiheen virta ja c) vääntömomentti askelmenetelmällä laskettuna. Laskennassa napakulma $\delta' = 80^\circ$.

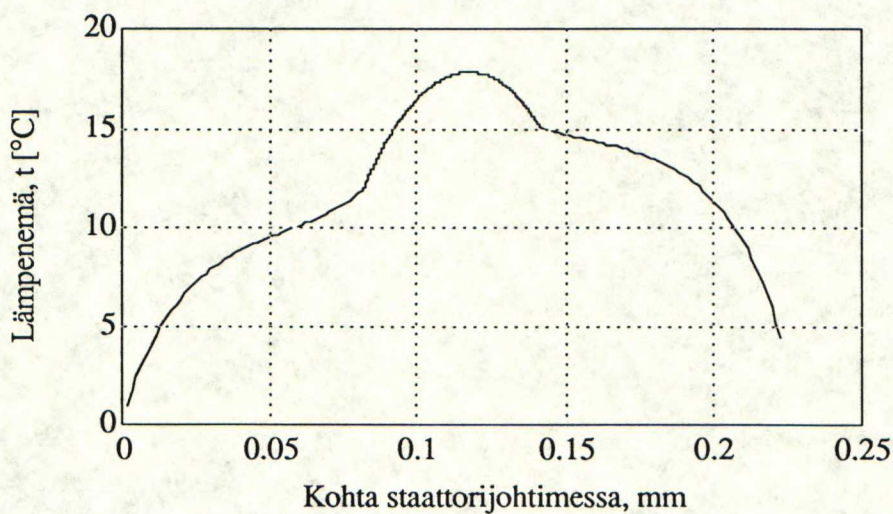
Taulukko 8. Kestomagneettimoottorin ominaisuuksia nimellispisteessä.

NdFeB		
U_s	[V]	350,0
δ'	[°]	80,0
T	[Nm]	0,385
I_s	[A]	35,7
J_s	[A/mm ²]	4,28
$\cos \varphi$		0,286
Häviöt		
P_s	[W]	539
P_r	[W]	34
P_{tot}	[W]	573

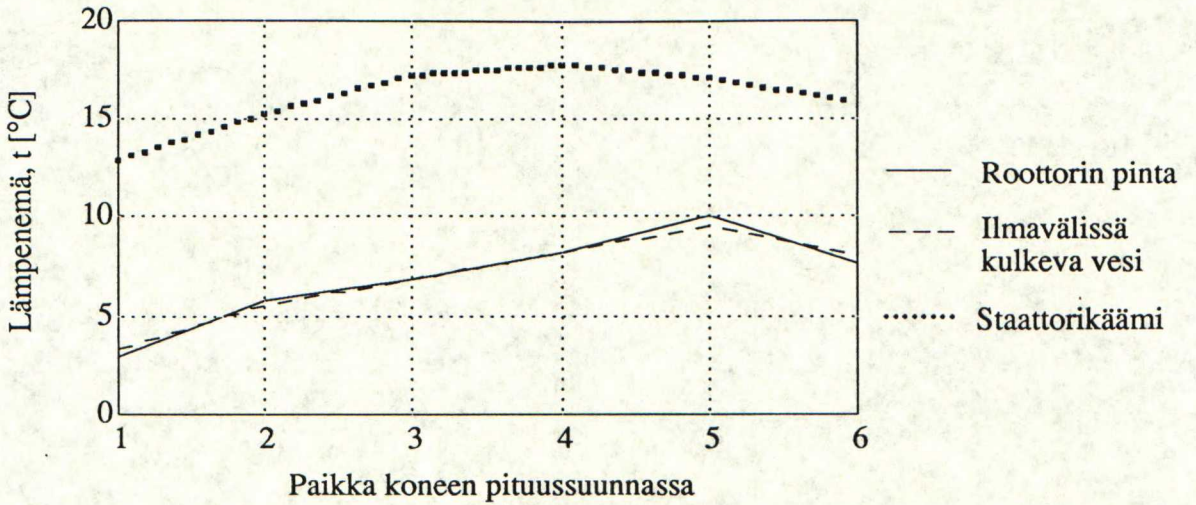
Nimellispisteessä muodostuu häviöitä seuraavasti:

$$P_{Fe,s}=147,1 \text{ W}, P_{Cu,s}=392,2 \text{ W ja } P_{h,r}=33,8 \text{ W}.$$

Vähäiset roottorihäviöt aiheutuvat yliaaltojen indusoimista pyörrevirroista, sillä roottori pyörii perusaallon suhteen tahtinopeudella, jolloin sen indusoimat pyörrevirrat ovat vähäisiä. Selkeästi suurimmat häviöt muodostuvat staattorijohtimissa. Staattorijohtimen lämpenemä vyyhdenpään keskikohdasta moottorin toisessa päässä olevan vyyhdenpään keskikohtaan on kuvassa 3.12. Kuvaajassa esiintyvät notkot osoittavat staattorin levypaketin sijainnin. Kuvan mukaan lämpenemä jää johtimissakin alle 20 °C. Tämä saattaa johtua osittain lämmönsiirtokertoimien määrittämisen epätarkkuudesta, mutta siinä näkyy myös veden tehokkuus jäähdytysaineena. Häviötehon jakautumisen aiheuttamat lämpenemäerot koneen eri osissa ilmenevät kuvasta 3.13.



Kuva 3.12. Kestomagneettimoottorin staattorijohtimien lämpenemä, kun $P_{Cu,s}=392,2 \text{ W}$. Veden kulkusuunta on kuvassa vasemmalta oikealle.



Kuva 3.13. Kestomagneettimoottorin lämpenemiä koneen eri osissa. Käyrä on piirretty murtoviivana staattorin levypaketin pituudelta pituusakselilla kuudessa eri kohdassa esiintyvistä lämpenemistä.

4 MOOTTORIVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Moottoreiden koon pienentyessä roottorin pinta-ala A , jonka läpi magnetointi tapahtuu, pienenee neliöllisesti, kun halkaisija pienenee lineaarisesti. Tämän seurauksena ulkoinen magnetointi vaikeutuu nopeasti koon pienentyessä.

$$\hat{\Phi} = \hat{B}A \quad (45)$$

Oikosulkumoottorissa roottorin magnetointi tulee kokonaisuudessaan staattorista, minkä vuoksi staattorin vuontiheyden täytyy kasvaa voimakkaasti, jotta roottoria voidaan riittävästi magnetoida. Tämä lisää häviöitä staattorissa. Kestomagneettimoottorin roottorissa oleva magneettimateriaali tuottaa itse osan tarvittavasta magnetoinnista, mikä pienentää ulkoisen magnetoinnin tarvetta. Tämä on selkeä etu pienissä koneissa.

Oikosulkumoottorin roottorihäviöt ovat toimintaperiaatteesta johtuen aina melko suuret. Rootorin sauvoissa kulkevat virrat aiheuttavat virtalämpöhäviöitä. Akseliteräs on myös suotuisa materiaali häviöiden muodostumiselle sähköisesti ja magneettisesti johtavana aineena. Perusaallon suhteen tahtinopeudella pyörivään kestopagneettimoottorin roottoriin indusoituu pyörrevirtoja lähinnä vain yliaaltojen vaikutuksesta. Ne ovat hyvin pieniä perusaallon oikosulkuroottoriin indusoiviin virtoihin verrattuna. Tästä syystä kestopagneettimoottorin häviöt ovat mitättömät oikosulkuroottoriin verrattuna.

Tutkituista vaihtoehtoista kestopagneettimoottori toimii paremmalla hyötysuhteella. Sen sähkömagneettiset häviöt ovat selvästi pienemmät kuin oikosulkumoottorilla. Lämpenemät on laskettu vain kestopagneettimoottorille, koska vastaavaa ohjelmistoa oikosulkumoottorille ei ollut käytössä. Laskettuja tuloksia voidaan käyttää apuna oikosulkumoottorin lämpenemistä arvioitaessa. Staattorissa häviöteholähteet ovat molemmilla moottorityypeillä samat, joten suuremmat häviöt saavat aikaan suuremman lämpötilan nousun. Rootorissa muodostuvat häviöt ovat oikosulkumoottorilla

huomattavasti suuremmat, minkä vuoksi lämpeneminen on voimakkaampaa. Sen materiaalit eivät kuitenkaan ole arkoja korkeille lämpötiloille; massiivinen akseliteräs ja kuparisauvat kestävät hyvin yli 200 °C lämpötiloja. Lisäksi vesi jäähdyyttä tehokkaasti suuretkin lämpötehot, joten veden ympäröimän roottorin lämpeneminen ei liene ongelma.

Oikosulkumoottoria voidaan käyttää tavallisella taajuudenmuuttajalla. Syöttöjännitteen ei tarvitse olla sinimuotoinen vaan suorakulma-aalto riittää syntyvistä häviöistä huolimatta. Tämä lieventää syöttölaitteelle asetettavia vaatimuksia.

Oikosulkumoottorin akseliteräksestä valmistettu roottori on lujarakenteinen ja se kestää suuria keskipakoisvoimia. Sen sijaan laskelmien mukaan alin taivutuskriittinen taajuus on molemmilla moottoreilla lähellä syöttötaajuutta. Kestomagneettiroottorissa oleva magneettimateriaali kestää todennäköisesti huomommin esiintyviä jännityksiä.

Kummallakin moottorityypillä saadaan tarvittava vääntömomentti. Kestomagneettimoottori toimii pienemmillä häviöillä ja sen koko saadaan selvästi pienemmäksi kuin oikosulkumoottorin; tässä tehdyissä simuloinneissa magneettia ympäröivän titaanipannan paksuus on ollut tarpeettoman suuri. Ohuempi panta jättää enemmän tilaa magneettimateriaalille, jolloin magnetointi tehostuu ja moottorin kokoa voidaan pienentää tarvittavan vääntömomentin aikaansaamiseksi.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tarkoituksena oli selvittää, kumpi moottorityyppi, oikosulku- vai kestopagneetti-moottori soveltuu paremmin tarkasteltaviin käyttöolosuhteisiin. Moottorilta vaadittavan vääntömomentin määrittämisessä käytettiin 20 % varmuusvaraa, jolla varauduttiin nestelaakereiden kitkahäviöihin ja moottorin sähkömagneettisiin häviöihin. Laskentatulosten perusteella kestopagneettimoottori on sähkötekniisesti parempi ratkaisu. Sen sähköinen hyötysuhde on suurempi ja häviöt sekä niiden myötä lämpenemät ovat pienemmät. Tähän ratkaisuun liittyy kuitenkin käytännön ongelmia mm. magneettimateriaalin kestävyys osalta.

Kokonaisuuden kannalta mekaaniset häviöt ovat merkittävämmät kuin sähköiset. Moottorin ilmavälissä ja nestelaakereissa muodostuvat vesikitkahäviöt ovat yli kaksinkertaiset sähköisiin häviöihin verrattuna. Tästä syystä pieni parannus sähköisessä hyötysuhteessa ei muuta kokonaishyötysuhdetta ratkaisevasti. Oikosulkumoottorin hieman huonompi hyötysuhde tulee korvattua lujalla ja yksinkertaisella roottorirakenteella. Oikosulkumoottori on rakenneratkaisuna helpommin toteutettavissa.

Koemoottorin rakentamista varten on ratkaistava lukuisia käytännön ongelmia. Moottorin käyttötaajuus ei voi olla niin lähellä ensimmäistä taivutuskriittistä taajuutta kuin se tässä esitetyillä mitoilla on. Esimerkiksi roottorin pituutta kasvattamalla voidaan siirtyä ylikriittiselle pyörimisnopeusalueelle pois ominaistuuksien läheisyydestä. Ylikriittisellä alueella toimiminen on kuitenkin huonompi ratkaisu kuin moottorin nimellistaajuuden pitäminen selvästi alle roottorin ensimmäisen taivutuskriittisen ominaistajuuden. Tässä työssä tehty mitoitus ei ole lopullinen vaan valmistusta varten sitä täytyy tarkistaa. Todellisessa moottorissa mm. staattorijohtimien virrantiheys saanee olla tässä esitettyä suurempi. Tällöin staattorin koko pienenee entisestään.

Luonnollinen jatko tälle tutkimukselle on uusi, tiukempi mitoitus koemoottorin valmistusta varten ja mittausten suorittaminen koemoottorilla. Sähköisillä mittauksilla tarkistetaan mitoituslaskennan oikeellisuutta. Moottorille tulee tehdä myös lämpenämimittauksia, joista saatavien tulosten avulla voidaan tarkentaa toistaiseksi todentamatonta lämpenemisen laskentaohjelmistoa.

6 YHTEENVETO

Työssä on tutkittu kahta moottorityyppiä, oikosulkumoottoria ja kestopagneetti-moottoria magneettikentän laskentaan perustuvien simulointiohjelmistojen avulla. Tavoitteena oli selvittää, kumpi moottorityyppi soveltuu paremmin suurnopeuspumpun käyttömoottoriksi. Moottorin läpi kulkeva pumpattava vesi ja suuri pyörimisnopeus yhdessä rajoittavat moottorin mittojen valintaa. Koneen ilmapälissä muodostuvat vesikitkahäviöt on laskettu analyyttisillä kaavoilla. Suuresta pyörimisnopeudesta aiheutuvien jännitysten ja roottorin ominaistajuuksien laskennassa käytettiin ulkopuolista asiantuntemusta. Tarvittavaa vääntömomenttia laskettaessa otettiin huomioon vesikitkasta aiheutuvat suuret mekaaniset häviöt.

Molemmista moottorityypeistä tehtiin alustava mitoitus perinteisen sähkökoneen suunnittelun keinoin. Siitä saatiin lähtökohta, jota tarkennettiin magneettikentän laskentaohjelmistolla sinimuotoisella syöttöjännitteellä. Tällä tavalla mitoitetuille geometrioille tehtiin paljon laskenta-aikaa vaativat aika-askelmenetelmään perustuvat simulointiajot moottorin nimellispisteessä ja sen läheisyydessä. Lopuksi laskettiin lähinnä tarkistukseksi kestopagneettimoottorin lämpenemiä materiaalien ominaisuudet ylittävien lämpötilojen havaitsemiseksi.

Moottorit ovat kolmivaiheisia ja niiden napaluku on kaksi. Staattorikäämitykseksi valittiin limikäämitys. Oikosulkumoottorin osalta tutkittiin kolmea roottorigeometriaa, joista parasta verrattiin kestopagneettiroottoriin. Tulosten mukaan kestopagneetti-moottori antaa vaadittavan vääntömomentin paremmalla sähköisellä hyötysuhteella. Lisäksi sen kokoa voidaan jatkomitoituksessa pienentää huomattavasti, jolloin päästään selvästi oikosulkumoottoria pienempään kokoon.

Moottoria on pyöritettävä taajuudenmuuttajalla, mikä ei tuota vaikeuksia sillä tarvittavan taajuus-tehoyhdistelmän laitteita on yleisesti kaupan. Oikosulkumoottorin rakenne on yksinkertainen ja luja. Oikosulkuroottorin valmistaminen on helpompaa kuin kestopagneettiroottorin. Kestopagneettimoottorin parempi hyötysuhde voidaan uhrata oikosulkumoottorin rakenteen yksinkertaisuudelle, varsinkin kun kokonaishyötysuhteessa merkittävin osuus on mekaanisilla häviöillä.

LÄHDELUETTELO

- Alasuvanto, T. 1990. Kestomagnetoidun tahtikoneen suunnittelu elementtimenetelmän avulla. Diplomityö TKK. 63 s.
- Dibelius, G. et al 1984. Experiments of friction, velocity and pressure distribution of rotating discs. Heat and mass transfer in rotating machinery. New York, Hemisphere publ. co.
- Esite 1990. Outokumpu Magnets OY
- Jokilaakso, A. 1987. Virtaustekniikan, lämmönsiirron ja aineensiirron perusteet. Hämeenlinna, Otakustantamo. 194 s.
- Jokinen, T. 1982. Pyörivän sähkökoneen suunnitteleminen. Espoo, TKK Offset. 72 s.
- Kays, W. M. 1980. Convective heat and mass transfer, 2nd ed., New York, McGraw-Hill Book Company, 680 s.
- Konstas, G. 1980. Entwicklung einer Asynchron-Drehstrom-Kleinmaschine für Drehzahlen bis 315 000 1/min. Stuttgart, Universität Stuttgart. 155 s.
- Larjola, J. 1984. Suurnopeustekniikka - uusi ratkaisu energianmuuntoon. Lappeenranta, LTKK/Energiatekniikan laitos, EN B 48. 17 s.
- Luomi, J. 1989. Svt-17.100 Sähkömekaniikka. Espoo, Otapaino, Opetusmoniste, 377 s.
- Polkowski, J. W. 1984. Turbulent flow between coaxial cylinders with the inner cylinder rotating. Journal of engineering for gas turbines and power, Vol. 106, s. 128-135.
- Pyrhönen, J. & Aura, L. 1983. Ultrasuurnopeussynkronimoottorin kehittäminen. Lappeenranta, LTKK/Energiatekniikan laitos, EN B-31, 56 s.
- Pyrhönen, J. 1988. Some aspects of high speed rotor design in electrical machines. In: Larjola, J (toim.). Proceedings of Conference On High Speed Technology. Lappeenranta, Finland. Lappeenranta University of Technology. S. 231-246.
- Tekniikan käsikirja 1. S. 223-226.
- Väänänen, J. 1992. Kestomagnetoidun suurnopeussähkömoottorin sähköisten ja termisten ominaisuuksien laskeminen. Diplomityö TKK. 93 s.
- Vogt, K. 1983. Elektrische Maschinen, 3. p. Berlin, VEB Verlag Technik. 500 s.

Liite 1: Laskennassa käytettäviä lähtötietoja

Taulukko 1. Staattorin levy materiaalin ominaisuuksia.

Staattorilevy BOCHUM HF 20	
Levyn paksuus	0,2 mm
Tiheys	7800 kg/m ³
Täytekerroin	0,95
Pyörrevirtahäviöluku ($B=1.0\text{ T}$, $f=50\text{ Hz}$)	0,05 W/kg
Hystereesihäviöluku ($B=1.0\text{ T}$, $f=50\text{ Hz}$)	1,56 W/kg
Levyn lämmönjohtavuus	78,0 W/mK
Lämmönjohtavuus levyjen välillä	1,0 W/mK

Taulukko 2. Roottorimateriaalien ominaisuuksia.

Akseliteräs	
Tiheys	7800 kg/m ³
Sähkönjohtavuus	$4,3 \cdot 10^6\text{ S/m}$
Lämmönjohtavuus	80,0 W/mK
Titaani Gr5	
Tiheys	4430 kg/m ³
Sähkönjohtavuus	$5,84 \cdot 10^5\text{ S/m}$
Lämmönjohtavuus	7,0 W/mK
Kestomagneetti NdFeB	
Tiheys	7400 kg/m ³
Sähkönjohtavuus	$7,14 \cdot 10^5\text{ S/m}$
Lämmönjohtavuus	8,5 W/mK
Remanenssivuontiheys B	1,08 T
Koersitiivikentänvoimakkuus H	-860 000 A/m